



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

**Gestão da Pressão na Modelação Hidráulica e
Exploração de Sistemas de Distribuição de Água
(Introdução de Válvulas Redutoras de Pressão)**

Ioland de Pina Tavares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof.^a Doutora Cristina Maria Sena Fael

Covilhã, Outubro 2011

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é uma obra que resulta de um enorme esforço não só do autor, mas também de várias pessoas que de diferentes formas contribuíram para a sua realização. Pelo que quero expressar o meu reconhecimento:

À Prof.^a Doutora Cristina Fael, Professora Auxiliar da Universidade da Beira Interior, orientadora científica, pela preocupação, cedência de material bibliográfico e principalmente por ter estado sempre presente durante o período de realização da presente Dissertação.

A quem tudo devo, meus Pais Rolando e Maria, pelo incentivo, conforto, protecção e por terem sempre acreditado em mim. Queria agradecer à minha família em geral, em particular à minha tia Luísa Barros, pela amizade demonstrada desde sempre e por ser para mim um exemplo de perseverança e motivação, às minhas avós Artemisa e Ana que mesmo não estando fisicamente presente entre nós continuam a ser os pilares do meu dia-a-dia e uma fonte de energia quando ela falta, e finalmente aos meus irmãos Nivaldo, Irlando, Iolanda e Ronaldo pelos importantes momentos de descontração no final de cada dia.

A todos os meus amigos que de uma maneira directa ou indirecta contribuíram para a execução deste trabalho, em particular ao Mirovaldo Nazaré, Walter Soares, Helga Pires, Filander Gomes, João Centeio, Edmir Freire, Liliana Patrício, Vânia Bastardo e Fátima Vila, meus amigos e colegas de sempre, durante todo o meu percurso académico.

À Fátima Alves, pela amizade, pela compreensão e carinho e, principalmente por todos os momentos de incentivo e apoio nas alturas mais difíceis, sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

E finalmente à empresa Águas da Covilhã, pelos dados do cadastro disponibilizados. E em particular à pessoa do Eng. Maurício pelo apoio e tempo cedido.

RESUMO

A presente dissertação insere-se no domínio da modelação hidráulica e exploração de sistemas de abastecimento de água, aplicado ao caso prático da rede de distribuição de água da Freguesia de Verdelhos, onde 70% da água que sai do reservatório de distribuição não é facturada.

Com o objectivo de minimizar o volume de água perdido na rede, e tendo em consideração que o sistema em causa se encontra completamente construído e em pleno funcionamento, a criação de um modelo computacional e a realização de uma gestão operacional da pressão, afiguram-se como objectos de extrema importância, permitindo à entidade gestora, através dos dados existentes no cadastro e sem prejudicar o normal fornecimento de água aos consumidores, estudar estratégias para redução das perdas reais de água.

Para o presente caso de estudo, procedeu-se a construção de um modelo computacional da rede de distribuição da localidade de Verdelhos, com auxílio do simulador hidráulico Epanet 2.0. Na qual foram estudados diversos cenários de funcionamento da rede; realizou-se a calibração do modelo; realizaram-se ensaios de fuga ao longo da rede de Verdelhos (através da manipulação de boca-de-incêndio).

A necessidade de efectuar-se ensaios de fugas, após calibração do modelo, advém da importância em assegurar que o mesmo representa fielmente as condições existentes no terreno, visto que ele servirá de base para a implantação no terreno de uma válvula redutora de pressão, com intuito de melhorar o desempenho hidráulico relativamente aos níveis de pressão e conseqüentemente à minimização das perdas físicas de água. Os resultados obtidos no modelo foram confrontados com leituras reais, facto que permitiu afirmar que o processo de calibração foi realizado com êxito.

As válvulas de controlo automático podem ser projectadas para os mais variados fins, destacando-se no presente trabalho, as redutoras de pressão visto serem um dispositivo fundamental na gestão operacional do controlo da pressão. O presente caso de estudo mostra que, nem sempre a melhor solução ao nível técnico (melhor desempenho hidráulico no que se refere aos níveis de pressão no sistema), coincide com a melhor solução do ponto de vista financeiro ou com o plano de gestão da rede definida pelas entidades gestoras.

PALAVRAS-CHAVE: Modelação Hidráulica; Válvulas Redutoras de Pressão; Gestão da Pressão em Sistemas de Distribuição de Água; EPANET 2.0

ABSTRACT

This work is part of the field of hydraulic modeling and operation of water supply systems, applied to a case study on Verdelhos water distribution network (70% of the water leaving the reservoir distribution is not billed).

In order to minimize the amount of water lost in the network, and taking into account that the system in question is fully constructed and fully operational, the creation of a computer model and implementing a management and operating pressure, appears as objects of extreme importance, allowing the system manager, through the existing data in the register and without prejudice the normal water supply to consumers, study strategies to reduce real water losses.

For this case study, we proceeded to build a computational model of the distribution network of Verdelhos with the aid of the hydraulic simulator EPANET 2.0. Which were studied in various scenarios of network operations; held on calibration of the model, tests were carried out along the Verdelhos water supply network (through the manipulation of hydrant).

The need to make leakage testing after calibration of the model results from the importance of ensuring that it faithfully represents the conditions existing on the field, since it will serve as the basis for the implementation on the ground of a pressure reducing valve, with to improve the hydraulic performance for levels of pressure and consequently the minimization of the physical loss of water. The results obtained in the model were compared with actual readings, to suggest that the calibration process was successful.

The automatic control valves can be designed for various purposes, especially in the present work, pressure-reducing because they are a key device in the operational management of pressure control. This case study shows that not always the best solution to the technical level (better hydraulic performance in relation to levels of pressure in the system), coincides with the best solution from a financial standpoint or the network management plan defined by managers.

KEYWORDS: Hydraulic Modeling; Pressure Reducing Valves; Pressure Management in Water Distribution Systems; EPANET 2.0

ACRÓNIMOS

ADC	Águas da Covilhã
AQA	Análise da Qualidade da Água
AWWA	American Water Works Association
CAD	Computer-aided Design
EG	Entidade Gestora
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos
IDA	International Desalination Association
IGU	Interface Gráfica com o Utilizador
INE	Instituto Nacional de Estatística
INSAA	Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água
INSAAR	Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais
IRAR	Instituto Regulador de Águas e Resíduos
IWA	International Water Association
IWI	International Water Institute
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
PEAASAR	Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais
PN	Pressão Nominal
PNA	Plano Nacional da Água
PVC	Policloreto de Vinilo
RASARP	Relatório Anual do Sector de Águas e Resíduos em Portugal
RC	Relatório de Calibração
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variável
SDA	Sistemas de Distribuição de Água
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VRP	Válvula de Controlo de Pressão a Jusante ou Válvula Redutora de Pressão
WWO	World Water Organization

ZMC

Zona de Medição e Controlo

SIMBOLOGIA

q_i^t	Consumo no Nó i no Instante t
q_i	Consumo-base no Nó i
P^t	Valor do Padrão de Consumo no Instante t
H	Pressão mínima de serviço
n	Número de pisos acima do solo incluindo o piso térreo
ΔH	Perda de Carga Localizada
HVRP	Cota piezométrica Definida na Válvula redutora de Pressão

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Objectivo e justificação do trabalho	6
1.3	Organização do trabalho	7
2	Exploração de Sistemas de Distribuição	8
2.1	Introdução	8
2.2	A Gestão da Água	8
2.3	Entidades Gestoras	9
2.3.1	Cadastro	10
2.4	Instrumentos de Simulação Hidráulica	11
2.4.1	Modelo Computacional	13
2.4.2	Epanet 2.0	15
2.4.3	Consumos	18
2.4.4	Calibração	19
2.5	Perda de Água	21
2.5.1	Perdas Reais e Perdas Aparentes	23
2.5.2	Vulnerabilidade de um Sistema	23
3	Válvulas Redutoras de Pressão	26
3.1	Válvulas redutoras de Pressão nos Sistemas de Distribuição	26
3.1.1	Pressão Regulamentar em Portugal	27
3.1.2	Válvulas Redutoras na criação Zonas de Medição e Controlo	28
3.2	Funcionamento das Válvulas Redutoras de Pressão	29
3.2.1	Configuração e comercialização das VRP	32
3.2.2	Instalação de uma VRP	35
4	Caso de estudo	37
4.1	Caracterização da rede de Distribuição de Água - Verdelhos	37

4.2	Calibração do modelo de exploração	41
4.2.1	Considerações gerais	41
4.2.2	Concepção do Modelo da Rede de Distribuição de Verdelhos	43
4.2.3	Definição de Consumos Facturados	43
4.2.4	Simulação em Período Alargado	46
4.2.5	Opções de Simulação Hidráulicas e de Tempos	47
4.2.6	Cenários para Análise de Sensibilidade	49
4.3	Ensaios de Fuga	62
4.4	Introdução de Válvulas Redutoras de Pressão no Modelo	66
4.4.1	Solução 1	68
4.4.2	Solução 2	72
4.4.3	Solução 3	75
4.4.4	Solução 4	77
4.4.5	Solução 5	80
4.4.6	Discussão dos Resultados	82
5	Conclusões	86
	Referências Bibliográficas	89
	ANEXOS	93
	Anexo I	99
	Anexo II	100
	Anexo III	101
	Anexo IV	103
	Anexo V	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da distribuição dos recursos hídricos no mundo (Adaptado da International Water Institute).	1
Figura 2 - Capitação em 2004 dos maiores consumidores (Adaptado de Environment Canada)...	2
Figura 3 - Esquema para controlo de perdas (Alegre et. al. 2005).....	4
Figura 4 - População servida por tipo de Entidade Gestora (INSAAR 2010).....	10
Figura 5 - Ambiente de Trabalho do EPANET 2.0 (Adaptado de Loureiro & Coelho, 2002)	17
Figura 6 - Representação de um mapa da rede em termos de nós e troços - EPANET 2.0.....	17
Figura 7 - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (Adaptado de Ormsbee et al, 1989)	18
Figura 8 - Efeito da introdução de uma VRP no controlo da pressão (Adaptado de Charalambous, 2005).....	26
Figura 9 - Esquema hierárquico das ZMC e opções de constituição das mesmas (Antunes et al., 2005)	29
Figura 10 - Funcionamento de uma Válvula Redutora de Pressão (Covas & Ramos, 1998)	31
Figura 11 - Funcionamento de diferentes sistemas de VRP (Covas & Ramos, 1998)	32
Figura 12 - Válvula com Ligação Roscada (Bello, 2001)	34
Figura 13 - Válvula com Ligação Flangeada (Bello, 2001)	34
Figura 14 - Construção de uma Câmara de Manobras para instalação de uma VRP (http://www.embasa.ba.gov.br/ , acedido 27/08/2011).....	35
Figura 15 - Exemplo de um “by-pass” (Adaptado - VALLOY, 2002)	36
Figura 16 - Localização da freguesia de Verdelhos (Extracto do mapa de Portugal)	37
Figura 17 – Fotografia panorâmica da localidade de Verdelhos	38
Figura 18 - Gráfico de isolinhas de cotas topográficas do SDA de Verdelhos - Extraído do EPANET 2.0.....	39
Figura 19 - Estação de tratamento e reservatório de armazenamento de 100 m ³	39
Figura 20 - Reservatório de distribuição de 100 m ³	40
Figura 21 - Esquema de implantação da Rede de Distribuição de Água de Verdelhos	40
Figura 22 - Indicação dos locais de medição de pressões utilizados na calibração - EPANET 2.0	42

Figura 23 - Áreas de facturação de consumo de água na freguesia de Verdelhos - ADC.	44
Figura 24 - Padrão de consumo da Rede de Distribuição - EPANET 2.0	46
Figura 25 - Padrão de consumo unitário (Para Grandes Consumidores) - EPANET 2.0.....	47
Figura 26 - Opções Hidráulicas adoptadas no simulador - EPANET 2.0.....	48
Figura 27 - Opções de tempo adoptadas no simulador - EPANET 2.0.....	48
Figura 28 - Relatório de calibração para o cenário 1 - EPANET 2.0.....	50
Figura 29 - Relatório de calibração para o cenário 2 - EPANET 2.0.....	51
Figura 30 - Locais de distribuição de 50% do volume de água não facturado no cenário 3 - EPANET 2.0	52
Figura 31 - Relatório de calibração para o cenário 3 - EPANET 2.0.....	53
Figura 32 - Relatório de calibração para o cenário 4 - EPANET 2.0.....	55
Figura 33 - Locais de distribuição do volume de água não facturado no cenário 5 - EPANET 2.0	56
Figura 34 - Relatório de calibração para o cenário 5 - EPANET 2.0.....	57
Figura 35 - Gráfico de correlação para pressão - EPANET 2.0	58
Figura 36 - Relatório de calibração para o cenário 5 - EPANET 2.0.....	61
Figura 37 - Dados relativos ao troço 820 - EPANET 2.0	61
Figura 38 - Comparação de valores Médios para Pressão - EPANET 2.0.....	60
Figura 39 - Pontos de fuga de água e de medição das pressões no 1º ensaio - EPANET 2.0....	63
Figura 40 - Pontos de fuga de água e de medição das pressões no 2º ensaio - EPANET 2.0....	64
Figura 41 - Pontos de fuga de água e de medição das pressões no 3º ensaio - EPANET 2.0....	65
Figura 42 - isolinhas de Valores Médios das Pressões no SDA de Verdelhos - EPANET 2.0	67
Figura 43 - Zona de introdução da Válvula Redutora de Pressão - EPANET 2.0.....	69
Figura 44 - Características da VRP utilizada na Solução 1 - EPANET 2.0.....	69
Figura 45 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 1 - EPANET 2.0.....	71
Figura 46 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 1 - EPANET 2.0.....	72
Figura 47 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 2 - EPANET 2.0.....	73
Figura 48 - Características da VRP utilizada na Solução 2 - EPANET 2.0.....	74
Figura 49 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 2 - EPANET 2.0.....	74
Figura 50 - Características da VRP utilizada na Solução 3 - EPANET 2.0.....	75

Figura 51 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 3 - EPANET 2.0.....	76
Figura 52 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 3 - EPANET 2.0.....	77
Figura 53 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 4 - EPANET 2.0.....	78
Figura 54 - Características da VRP utilizada na Solução 4 - EPANET 2.0.....	79
Figura 55 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 4 - EPANET 2.0.....	79
Figura 56 - Características da VRP utilizada na Solução 5 - EPANET 2.0.....	80
Figura 57 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 5 - EPANET 2.0.....	81
Figura 58 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 5 - EPANET 2.0.....	82
Figura 59 - Cenário utilizado para a criação da Solução 5 - EPANET 2.0.....	83
Figura 60 - Resumo das isolinhas de Valores Médios das Pressões das 5 Soluções - EPANET 2.0.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de gestão em Portugal (PEAASAR, 2007)	9
Tabela 2 - Programas de modelação hidráulica (Vidigal, 2008)	12
Tabela 3 - Programas de modelação hidráulica (Vidigal, 2008)	20
Tabela 4 - Componentes do balanço hídrico (Adaptado - Alegre et al., 2005)	22
Tabela 5 - Tabela de preços de Válvulas Redutoras de Pressão (Saint-Gobain)	35
Tabela 6 - Características do Sistema de Abastecimento da Covilhã.....	38
Tabela 7 - Características das condutas da rede de distribuição	41
Tabela 8 - Pressões medidas na rede	41
Tabela 9 - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final	45
Tabela 10 - Calculo dos Volumes de água facturado e não facturada.....	49
Tabela 11 - Distribuição do volume de água não facturada no cenário 4.....	54
Tabela 12 - Distribuição do volume de água não facturada no cenário 5.....	56
Tabela 13 - Síntese dos resultados obtidos nos 5 relatórios de calibração apresentados.....	59
Tabela 14 - Relatório de calibração para os nós 10 e 230.	60
Tabela 15 - Pressões antes e durante a fuga (Teste 1).....	63
Tabela 16 - Pressões antes e durante a fuga (Teste 2).....	65
Tabela 17 - Pressões antes e durante a fuga (Teste 3).....	66
Tabela 18 - Pressões máximas no nó 50	86

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

A história do homem no planeta terra confunde-se com a história da água. Com as sociedades cada vez mais industrializadas, é imperativo uma consciência generalizada de que a utilização dos recursos hídricos naturais, não devem colocar em risco as condições básicas da sustentação da vida na terra no imediato, nem limitar as aspirações do desenvolvimento das gerações futuras.

Segundo Villiers 2001, a crise da água não consiste na falta absoluta do recurso, mas na escassez justamente nos lugares de maior demanda. Hoje existe a mesma quantidade de água no planeta terra que existia na pré-história, mas as pessoas estão usando muito mais esse precioso recurso do que é ecologicamente sensato, pois os seres humanos, que dependem essencialmente de água para viver, desperdiçam, poluem e mudam os ciclos hidrológicos.

As grandes mudanças tecnológicas que se verificaram em todo mundo a partir do século XIX e que se regista até aos nossos dias tiveram grande impacto económico e social, visto que a máquina foi superando o trabalho humano. Em meados do século XX, o êxodo rural provocado pelo progressivo crescimento do sector industrial levou ao aumento dos aglomerados urbanos e conseqüentemente um aumento na procura de água.

O acesso a água potável é um direito básico fundamental para qualquer ser humano, todavia esse direito não traduz a realidade de todos os homens deste planeta. No que concerne a questões relacionadas com a facilidade de acesso/escassez e consumo de água, as assimetrias são nítidas como é possível ver na Figura 1.

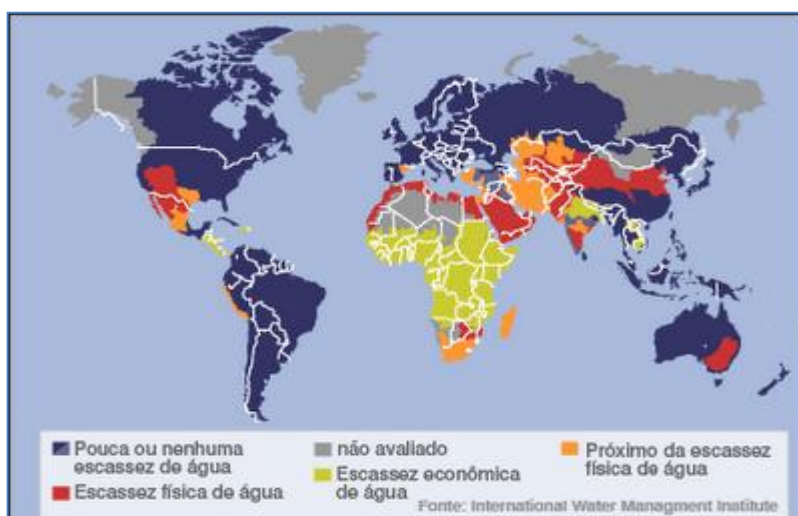


Figura 1 - Mapa da distribuição dos recursos hídricos no mundo (Adaptado da International Water Institute).

De acordo com a Water World Organization (WWO), o volume de água que, em média, cada habitante do continente Americano gasta por dia, designada por capitação, é de 100 - 170 litros por dia e por habitante (l/hab. dia), em contrapartida uma família Africana consome em média em média 5 litros por dia.

Segundo Marques & Sousa 2008, o volume de água que, em média, cada habitante gasta por dia constitui um índice aferidor do grau de civilização de um povo. Isto porque, à medida que aumenta o nível de vida e o bem-estar, surgem necessidades adicionais e o consumo de água aumenta consideravelmente.

A Figura 2 ilustra a capitação, no final do ano de 2004, dos maiores consumidores mundiais desse recurso. Neste gráfico, países como os Estados Unidos da América e o Canada afiguram como os que apresentam maior consumo.

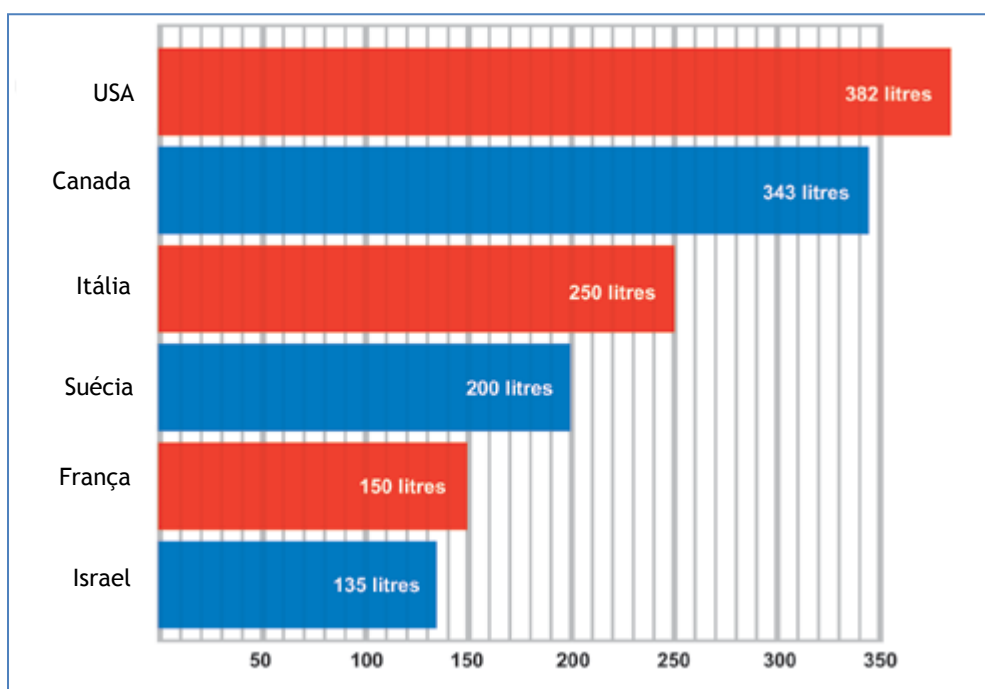


Figura 2 - Capitação em 2004 dos maiores consumidores (Adaptado de Environment Canada)

Os volumes de água consumidos diariamente nos países ilustrados na figura 2 não reflectem a dificuldade de acesso ao mesmo recurso que se verifica em certas zonas do globo, como a África Subsariana e a Oceânia. Seguidamente são citados exemplos de como a água para consumo humano é obtida, em certas regiões onde ela é um bem de difícil acesso.

- ❖ Tomando para exemplo a Líbia, território localizado em uma das áreas secas mais instáveis politicamente do mundo, tem aproximadamente a área combinada do Reino Unido, França e Alemanha. Coberta na sua maioria pelo deserto de Sahara, que é uma das regiões mais áridas do planeta. O país tem a maior linha de costa do Norte de África e é nessa região onde habita a maior parte da sua população. Segundo Oxford

Business Group (The Report: Libya 2008), o projecto Great Man-Made River lançado pelo líder Muammar Qaddafi consiste em explorar vastas reservas de água subterrâneas que se encontram a 600 metros de profundidade em pleno deserto do Sahara, construindo para isso mais de 4000 km de condutas de betão com 4 metros de diâmetro. Com o projecto a água potável será transportada ao longo do país através do deserto até às áreas urbanas situadas na costa.

- ❖ Segundo a International Desalination Association (IDA), em 2007 foram produzidas diariamente no mundo inteiro 45,5 bilhões de litros de água potável a partir da água do mar. Os Emirados Árabes Unidos utilizam o processo de destilação multi-estágios para produzir 9,460 l/s.
- ❖ São ainda mais desesperantes, os factos ocorridos nos poços do deserto do Sahara. Com uma profundidade de 80 metros, eram escavados à mão durante a noite até chegar a uma camada de calcário, sob a qual a água se encontrava retida sob grande pressão. De seguida o homem mais velho do grupo, furava lentamente a camada de calcário, até que o ultimo golpe da picareta fizesse saltar, com uma violência incrível a tão preciosa água. Ela enchia rapidamente o poço, subindo até a superfície, levando consigo o velho, morto ou tragicamente moribundo. Nenhum esforço ou nenhum sacrifício é mais pesado para arranjar água (De Marsily, 1994).

Segundo informações recolhidas na WWO, desde 1950 a população mundial duplicou e o consumo de água triplicou, esta diferença deve-se ao facto de a água ser um recurso fundamental para a vida, estratégico e essencial para o desenvolvimento socioeconómico. Por outro lado, esse facto é inquietante, visto que, apesar de 2/3 da superfície terrestre esteja coberto de água (planeta azul), apenas 1% desse mesmo recurso está disponível para o consumo humano.

Tanto no Plano Nacional da Água (PNA), como no Plano Nacional para o Uso Eficiente da Água de 2002 e 2005, respectivamente, ambos realizados pelo Ministério do Ambiente, Portugal apesar de referenciado como um país onde existe pouca ou nenhuma escassez de água, apresenta no entanto problemas no abastecimento de água potável aos seus habitantes, fundamentalmente, por carência temporal e espacial, utilização irracional e insustentável, insuficiente reciclagem e reutilização das águas residuais e degradação da sua qualidade.

A ineficiência de uso, sob a forma de perda de água, é uma realidade em todos os Sistemas de Distribuição de Água (SDA) do globo, variando a sua percentagem, que depende em grande medida de factores como as características físicas do próprio SDA, do nível de tecnologia e conhecimentos aplicados para controlar essas perdas.

Segundo Rogers & Davey (2005) foram contabilizadas em diversas cidades asiáticas perdas reais de água que rondam os 75% da água existente nos SDA. Em Adis Abeba na Etiópia, cerca de 50% da água produzida é perdida, o mesmo nível é relatado para a cidade de Mutare, Zimbabwe.

No espaço Europeu, estima-se que Portugal seja um dos países que apresenta os maiores valores de perdas de água, representando em 2001 cerca de 40% da água fornecida aos SDA (Alegre *et al.*, 2005), chegando a alcançar os 70% em algumas redes de distribuição, como é o caso da localidade de Verdelhos na cidade da Covilhã (Caso de estudo no presente trabalho), contrastando com a Alemanha que em 1999 apresentava uma média anual de 5%.

Reveste-se cada vez de maior importância a implementação, por parte das entidades gestoras, de políticas e medidas tanto reactivas como proactivas, para detecção e prevenção de fugas e rupturas. Essas políticas para além de beneficiar o consumidor e o ambiente, também reflecte directamente a eficiência das empresas gestoras.

A Figura 3 esquematiza, as três principais etapas a implementar por parte das entidades gestoras, no sentido de controlar e diminuir o volume de perdas físicas de água nas redes de distribuição. Sendo a primeira fase, a de estudo do problema e definição do modo operando; a segunda, a de implementação da solução estudada anteriormente e a terceira e última fase serve para avaliar a eficiência das medidas tomadas.

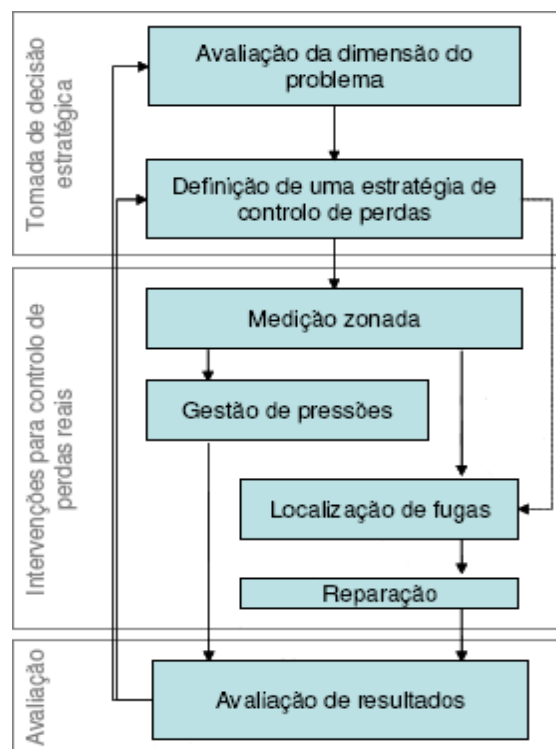


Figura 3 - Esquema para controlo de perdas (Alegre *et al.* 2005)

A gestão da pressão existente nas redes de distribuição é uma etapa determinante, visto que, ao contrário do que se sucede com os colectores das redes de drenagem de águas residuais e pluviais, em que o esforço predominante é a pressão externa devido ao peso dos terrenos e às sobrecargas, nos sistemas de abastecimento de água o esforço predominante é a pressão interna. Ela origina tensões normais que actuam sobre a fronteira da tubagem provocando tracção no material.

Para muitos autores, a melhor solução para redução da pressão é através da utilização de Válvulas Redutoras de Pressão/Válvulas de Controlo da Pressão a Jusante (VRP), ou câmara de perda carga. Segundo Marques & Sousa 2008, a VRP destina-se a assegurar que a pressão a jusante da mesma não seja superior a um valor previamente estabelecido, provocando perdas de carga localizadas cujos valores são automaticamente adaptados em função das condições existentes. As câmaras de perda de carga não são mais do que pequenos reservatórios intermédios em que uma parte da energia hidráulica do escoamento é dissipada à entrada, sob a forma de perda localizada, definindo assim uma nova cota de referência para os cálculos a jusante.

Para este estudo, optou-se pela introdução de uma VRP na rede de distribuição, com intuito de fazer um controle da pressão e assim analisar a influência da mesma na redução da perda de água.

1.2 Objectivo e justificação do trabalho

O principal objectivo do estudo é a concepção de um modelo computacional baseado no simulador hidráulico EPANET 2.0 e proceder a uma gestão operacional da pressão no SDA da Freguesia de Verdelhos, de modo a minimizar as fugas ou rupturas e a consequente redução das perdas reais de água.

De modo a atingir esse objectivo, e tendo por base o cadastro disponibilizado pela empresa Águas da Covilhã (ADC), entidade gestora (EG) da rede de distribuição de Verdelhos, e os dados obtidos na campanha de medição de caudais realizados na rede e posteriormente fornecidos pela referida EG a propósito do presente trabalho, procedeu-se ao seguinte conjunto de tarefas;

- ❖ Construção de um modelo computacional, com auxílio do simulador hidráulico Epanet 2.0;
- ❖ Calibração do modelo, de modo a servir como uma importante ferramenta de apoio no processo de tomada de decisões futuras;
- ❖ Realização de ensaios de fuga, com intuito de aferir a validade do modelo computacional calibrado;
- ❖ Com base no modelo, escolher estrategicamente locais na rede de distribuição onde possa ser inserida uma VRP, de modo a reduzir a pressão a valores mínimos sem prejudicar o consumidor.

A escolha do SDA da localidade de Verdelhos para realização deste estudo justifica-se, fundamentalmente, pela possível ligação entre os elevados valores de pressão interna registados na rede e a discrepância constatada entre o volume de água introduzida no sistema e o volume de água que é efectivamente facturada pela entidade gestora (70% da água que sai do reservatório de distribuição não é facturada). Associado ainda ao facto de a ADC, não ter realizado um controlo de pressão nesta rede de distribuição.

Salienta-se ainda o facto de na presente localidade se verificar uma grande variação topográfica, com uma diferença de cota na ordem dos 100 metros entre o seu ponto mais alto (reservatório de distribuição) e o ponto mais baixo do seu SDA.

1.3 Organização do trabalho

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo o presente capítulo de carácter introdutório.

No capítulo 2 efectua-se uma revisão das principais questões relacionadas com a temática da exploração de sistemas de distribuição de água. Este capítulo está dividido em 5 subcapítulos, onde o primeiro é de carácter introdutório, o segundo aborda as questões relacionadas com uma adequada gestão da água, o terceiro centra-se nas entidades gestoras de SDA e a sua situação em Portugal, no quarto é abordado o papel dos instrumentos de simulação hidráulica na exploração dos SDA e por fim no quinto é abrangida a problemática da perda de água nas redes.

No Capítulo 3 analisa-se em detalhe aspectos ligados com a aplicação de válvulas redutoras de pressão em sistemas de distribuição de água. Nesta secção é realizado um levantamento no domínio do comportamento hidráulico, configuração, funcionamento, instalação e comercialização das VRP e ainda a importância/influência da sua utilização na gestão operacional de SDA.

No capítulo 4 apresenta-se o caso de estudo. Neste capítulo mostra-se de que forma foi feito o estudo, caracteriza-se o sistema de distribuição de água da freguesia de Verdelhos, descreve-se o processo de modelação da rede em questão e, com base no simulador hidráulico Epanet 2.0, apresenta-se o processo de calibração/validação do modelo computacional e atestam-se ainda diferentes locais na rede para a introdução de uma válvula redutora de pressão.

No capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões obtidas e as recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, são ainda apresentados 5 anexos considerados importantes, para uma melhor compreensão do estudo realizado.

No **anexo I** apresenta-se a listagem do ficheiro de introdução de dados do sistema de água para o Epanet 2.0; no **anexo II** apresenta-se a tabela completa relativa à atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final, para todos os nós existentes na rede; no **anexo III** apresenta-se a tabela com os valores dos coeficientes do padrão de consumo para os nós da rede; no **anexo IV** apresentam-se as envolventes de caudal instantâneo ao longo da semana e no **anexo V** os padrões adimensionais de caudal (Global, dias úteis, sábado e domingo);

2 Exploração de Sistemas de Distribuição

2.1 Introdução

Como se referiu anteriormente, este capítulo está organizado em cinco subcapítulos e nele pretende-se analisar os principais conceitos relacionados com questões relacionadas com a exploração de sistemas de distribuição de água, largamente utilizados no decorrer do presente estudo. Este capítulo permitirá ao leitor, uma melhor percepção sobre: a importância de uma gestão adequada da água; o papel das entidades gestoras e a sua situação em Portugal; os instrumentos de simulação hidráulica e sobre a problemática da perda de água nas redes de distribuição.

2.2 A Gestão da Água

De acordo com a figura 2 apresentado na secção 1.1, onde se pode verificar que, por exemplo, nos Estados Unidos da América, em 2004 a capitação (este abrange não só a água para higiene, lavagens de roupa e louça, mas também a água consumida pelo pequeno comércio e lavagens de rua), é de 382 l/hab. dia. Sabendo que um ser humano, somente para beber, consome em média dois litros de água por dia é fácil perceber que mais de 99% da água potável que chega às torneiras dos consumidores norte americanos, não é efectivamente consumida. Desta feita, o consumo humano não implica uma redução da quantidade da água, porque esta acaba por ser restituídas as suas fontes de abastecimentos iniciais, porém este acarreta prejuízo na sua qualidade.

O Abastecimento doméstico, abastecimento industrial, produção de energia hidroeléctrica, irrigação, pecuária, pescas e recepção de resíduos, são exemplos de formas como o homem usa a água em seu benefício. Sendo a água um alicerce e pré-condição para o desenvolvimento, os dados acima apresentados, relembram a necessidade de agir no sentido de uma utilização mais racional e eficaz, sem perdas nem desperdícios, de estimular a reciclagem e de otimizar a gestão deste recurso.

Está em vigor, desde 2005, o Programa Nacional para o Uso Eficiente de Água, onde se incluem medidas técnicas de interesse da Engenharia. O objectivo destas medidas passa pela redução de perdas de água e controlo de pressões nos sistemas de abastecimento; isolamento térmico do sistema de distribuição de água quente; instalação de sistemas de poupança de água nas redes prediais; racionalização do consumo doméstico, privilegiando a reutilização de água; e ainda aplicação de novas tecnologias de gestão de informação e controlo à distância, que possibilitam a avaliação instantânea das condições dos sistemas de produção, tratamento e distribuição de águas.

Segundo Batista *et al.*, no Relatório Anual do Sector de Águas e Resíduos em Portugal (RASARP) de 2008, o país apresenta um número muito elevado de sistemas de abastecimento de água, que resulta não só da atribuição de competências autárquicas nesta matéria, mas também como resposta à elevada dispersão populacional verificada no território nacional. Esta situação dificulta, em grande medida, a gestão técnica e económica dos sistemas, quer pelo elevado número de sistemas de muito pequena dimensão e muitas vezes precários, quer pelo grande número de entidades gestoras sem escala para assegurar níveis adequados de serviço e económica na exploração.

2.3 Entidades Gestoras

De acordo com a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) 2011, o sector de serviços de águas, conforme é usualmente denominado, compreende as actividades de abastecimento de água às populações, urbanas e rurais, e às actividades associadas inserida na malha urbana, como o comércio e a indústria. Compreende também a drenagem e o tratamento de águas residuais urbanas, que incluem as águas residuais de origem doméstica, comercial e industrial e também as águas de origem pluvial.

Neste sector, regulado pelo Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), coexistem numerosos e diversificados tipos de entidades gestoras concessionárias de serviços de águas, de titularidade estatal e municipal, com diversos modelos de gestão;

- ❖ Prestação directa de serviço (ex. serviços municipais, serviços municipalizados e associações de municípios);
- ❖ Delegação do serviço (ex. empresas municipais e intermunicipais, juntas de freguesia);
- ❖ Prestação do serviço através de parceria entre entidades públicas;
- ❖ Concessão do serviço (ex. empresas concessionárias multimunicipais e empresas concessionárias municipais).

Na tabela 1 apresenta-se, o número de entidades gestoras de sistemas de distribuição de água existentes em Portugal, no ano de 2007, e a distribuição destes números consoante o modelo de gestão aplicado em cada uma delas.

Tabela 1 - Modelos de gestão em Portugal (PEAASAR, 2007)

Modelos de Gestão	Nº
Serviços municipais	210
Serviços municipalizados	33
Empresas municipais	9
Concessões	26
TOTAL	278

Por outro lado, na Figura 4 apresenta-se, em percentagem, para um universo de 257 entidades, a população servida por cada tipo de entidade gestora de SDA.

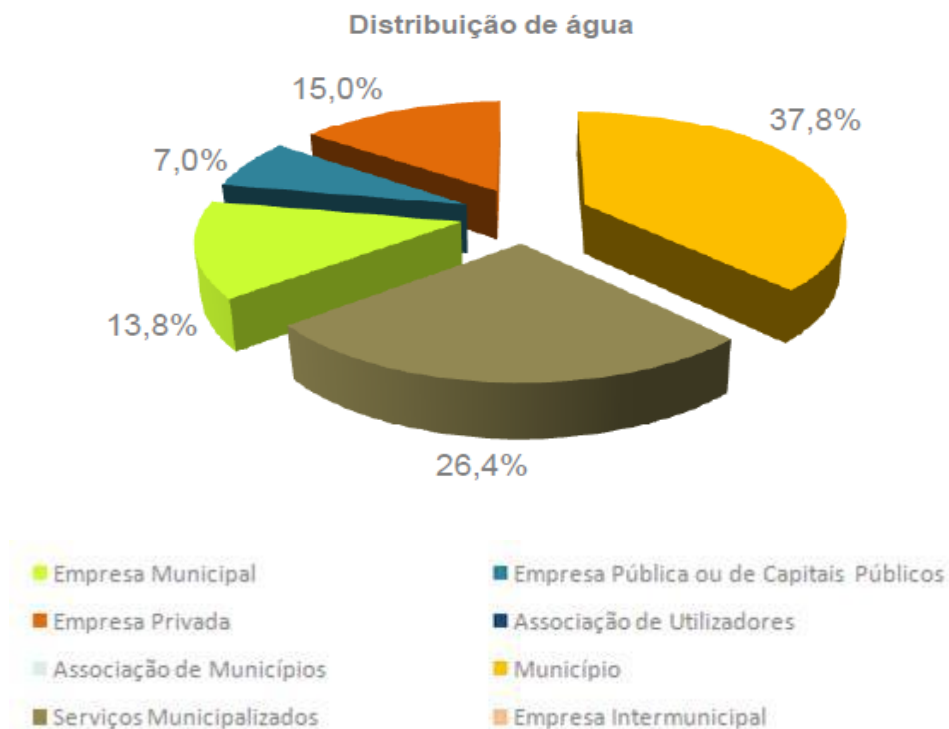


Figura 4 - População servida por tipo de Entidade Gestora (INSAAR 2010)

A grande irregularidade em termos da densidade populacional que se verifica no território Português condiciona o abastecimento de água para consumo urbano por parte das entidades gestoras, que na maioria dos casos são do domínio dos municípios. Isto porque, grande parte dos municípios tem, segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE), menos de 30 000 habitantes facto que faz com que as entidades gestoras sejam de pequenas dimensões, desagregadas e dispersas, limitando desde modo tanto o orçamento como os recursos técnicos e humanos das mesmas.

O exposto anteriormente, justifica o facto de a maioria das entidades gestoras nacionais, ainda não possuírem a capacidade de implementação de técnicas avançadas de controlo e exploração dos sistemas de distribuição de água.

2.3.1 Cadastro

A definição de objectivos, recolha, validação, arquivo e manutenção, inventariação e sistematização necessária dos dados são as etapas fundamentais a serem respeitadas na elaboração de um cadastro. De forma resumida, o cadastro consiste na recolha e armazenamento de uma ampla gama de informações relativas a todas as secções de um sistema de distribuição de água.

A preocupação com a inclusão do cadastro na gestão das empresas não é recente, em Portugal já a algumas décadas que o cadastro é uma peça obrigatória nos arquivos de todas as Entidades Gestoras (EG) e o Art.10º do projecto de Regulamento Geral de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais (CSOPT e LNEC, 1991) já era claro em relação aos requisitos mínimos que o mesmo tinha que preencher: *“os cadastros devem estar permanentemente actualizados e conter, no mínimo: “a) a localização em planta das condutas, acessórios e instalações complementares, sobre a carta topográfica à escala compreendida entre 1:500 e 1:2 000, com implantação de todas as edificações e pontos importantes; b) as secções, profundidades, materiais e tipos de juntas das condutas; c) natureza do terreno e condições de assentamento; d) a ficha individual para ramais de ligação e outras instalações do sistema.”*

Actualmente, o cadastro é uma ferramenta de trabalho imprescindível para diversos sectores das entidades gestoras, permitindo que seja de fácil execução não só as tarefas mais simples, mas também as medidas complexas a serem aplicadas nas redes de distribuição, já que os profissionais estão cada vez mais esclarecidos sobre o estado da mesma. Todavia o facto de as directivas sobre a informação cadastral serem bem claras, não implica que os dados que nela se encontram (ou se esperam encontrar) sejam respeitados por todas as empresas, chegando mesmo a variar de uma entidade para outra. O cadastro pode ser em formato papel ou informatizado, sendo a principal dissemelhança entre as duas, a comodidade que a solução informatizada permite na criação de cartas para cada tipo de função.

2.4 Instrumentos de Simulação Hidráulica

Os instrumentos de simulação hidráulica, têm vindo a ser estudados e desenvolvidos nas últimas décadas. Porém, a grande expansão na utilização verificada actualmente está intimamente ligada com a utilização em larga escala dos microcomputadores.

A grande disponibilidade e facilidade de acesso a microcomputadores associada a uma simplificação desses instrumentos permitiram que essa tecnologia tivesse hoje disponível para todos e em alguns casos gratuitamente.

Na tabela 2 apresenta-se uma síntese das características de alguns programas de simulação hidráulica disponíveis no mercado, tais como, a possibilidade de realizar uma Análise da Qualidade da Água (AQA), da Interface Gráfica com o Utilizador (IGU), da existência de versão de demonstração e da sua natureza.

Salienta-se o Epanet 2.0 por ser o escolhido para desenvolver este estudo. A escolha deve-se essencialmente, ao facto de o Epanet 2.0 ser um software distribuído gratuitamente, apesar de ser uma referência mundial no sector de Abastecimento de Água.

Tabela 2 - Programas de modelação hidráulica (Vidigal, 2008)

Programa	AQA	IGU	Demo Disponível	Natureza
AquaNet	x	x	-	Comercial
Archimed	x	x	x	Comercial
Branch/Loop	-	-	-	Gratuito
Cross	x	x	-	Comercial
Epanet 2.0	x	x	-	Gratuito
Eraclito	x	x	x	Comercial
H2O net/ H2O map	x	x	-	Comercial
Helix delta - Q	-	x	-	Comercial
Mike Net	x	x	x	Comercial
Netis	x	-	-	Gratuito
Opti Designer	-	-	x	Comercial
Pipe 2000	x	x	x	Comercial
Stanet	x	x	x	Comercial
Wadisco SA	x	x	x	Comercial
WaterCAD 5.0	x	x	x	Comercial

Apesar da validade de um modelo computacional depender, na sua maioria, da fiabilidade e exactidão dos elementos existentes no cadastro, o instrumento de simulação também tem uma importância vital nos processos de concepção e calibração do modelo e ainda na fase da exploração de um Sistema de Distribuição de Água.

O grande número de programas disponíveis e a sua grande versatilidade faz dos instrumentos de simulação hidráulica, uma ferramenta de apoio fundamental para as entidades gestoras, visto que através de modelos computacionais e sem interferir com o sistema no terreno permitem que os profissionais tenham a capacidade de realizar uma rápida e eficaz análise de sensibilidade e de exploração de diversos cenários, com suficiente aproximação ao sistema em causa.

Os programas de modelação permitirão fazer uma descrição gráfica de toda a infra-estrutura física, possibilita também ao utilizador proceder a uma construção de uma descrição pormenorizada das solicitações (os consumos de água e os modos de operação).

Permitem ainda calcular o equilíbrio hidráulico, exprimindo de forma numérica e gráfica os valores de variáveis como: a pressão, a cota piezométrica, a velocidade de escoamento, a perda de carga e o caudal.

2.4.1 Modelo Computacional

Os modelos de simulação têm múltiplas aplicações nos domínios do planeamento, projecto, operação, manutenção e reabilitação de sistemas de transporte e distribuição de água. De entre as utilizações mais comuns poderão destacar-se (Coelho *et al.* 2006):

- ❖ O dimensionamento dos sistemas, através da procura das melhores topologias, da escolha de diâmetros e materiais para as condutas e restantes componentes, e do dimensionamento de reservatórios e instalações elevatórias;
- ❖ A simulação de problemas e cenários de operação corrente, como sejam consumos de ponta sazonal, gestão dos níveis em sistemas com múltiplos reservatórios de serviço, ou situações de emergência como falhas em grupos elevatórios ou o combate a incêndios;
- ❖ O treino de operadores em sistemas de operação complexa, evitando que a aprendizagem incorra em riscos directos para o sistema e para os consumidores;
- ❖ O controlo e optimização de parâmetros de qualidade da água, como por exemplo a manutenção de um residual adequado de cloro, a localização de equipamentos de re-cloragem, o controlo de tempos de percurso ou a escolha de pontos de amostragem;
- ❖ A reabilitação de sistemas deficientes, e a programação das intervenções com minimização de impacto no consumidor;
- ❖ A redução e/ou recuperação da energia de bombeamento;
- ❖ O controlo de perdas de água, por exemplo através de programas de redução de pressões de serviço.

No território Português, a modelação computacional de Sistemas de Abastecimento de Água, era até o ano 2000 encarada como um acessório e não considerada uma ferramenta de apoio para o dia-a-dia das empresas dessa indústria, sendo que a sua utilização era de uso exclusivo dos investigadores para a análise de questões teóricas ou fins experimentais.

Em Vidigal (2008), apresentam-se os resultados de um inquérito nacional, realizado no mesmo ano, com intuito de conhecer a evolução da modelação hidráulica em Portugal até à data, em especial, na prática corrente da gestão dos sistemas. Relativamente à percentagem de entidades gestoras com modelos matemáticos aplicados a alguns dos seus sistemas, observou-se que 78% das entidades questionadas não dispunham de modelos matemáticos de nenhum dos seus subsistemas, e os 22% das entidades dispõem de modelos matemáticos de alguns dos seus sistemas.

A reduzida utilização destas ferramentas prende-se com os seguintes factores:

- ❖ A necessidade de alguma especialização técnica para uma correcta abordagem ao desenvolvimento de modelos;
- ❖ A dificuldade em gerar os dados necessários para construir e manter um modelo, a partir da informação disponível, por esta ser insuficiente, se encontrar dispersa ou não possuir a qualidade pretendida;
- ❖ O facto de a manutenção dos modelos exigir a definição de procedimentos sistemáticos e a afectação específica de recursos humanos, sem os quais um modelo rapidamente se torna obsoleto.

Ao contrário da situação Portuguesa onde uma fatia considerável das entidades gestoras não faz um grande investimento nessa tecnologia, em muitos países desenvolvidos, à modelação computacional tem um lugar de evidência no sector de abastecimento de Água.

Coelho *et al.* (2006) esquematiza o faseamento adequado ao desenvolvimento de um modelo assim como os principais objectivos das diferentes fases envolvidas:

Fase A - Planeamento do modelo:

- ❖ Definição do sistema a estudar, âmbito e objectivos do modelo;
- ❖ Levantamento preliminar de dados de cadastro e projectos;
- ❖ Definição da estrutura/codificação dos dados a modelar;
- ❖ Definição de opções/configurações da modelação.

Fase B - Construção do modelo - descrição da infraestrutura:

- ❖ Introdução dos dados de localização das infraestruturas e respectivas características - cadastro das redes, de reservatórios, das estações elevatórias e de válvulas;
- ❖ Organização dos respectivos elementos segundo a estrutura definida.

Fase C - Construção do modelo - descrição de consumos e caudais:

- ❖ Recolha e formatação de dados de medição de caudais;
- ❖ Análise estatística de dados de caudal, produção de padrões de consumo e tipificação de cenários;
- ❖ Recolha de elementos relativos à distribuição espacial de consumos na rede;
- ❖ Estimativa e afectação de consumos nos nós da rede;
- ❖ Processamento dos dados para carregamento no modelo.

Fase D - Construção do modelo - controlo operacional:

- ❖ Análise das regras de operação do sistema, nomeadamente níveis de operação de reservatórios, regulações de válvulas, bombas e entregas de caudal;
- ❖ Refinamento e tipificação de cenários;
- ❖ Processamento dos dados para carregamento no modelo.

Fase E - Implementação da solução - base:

- ❖ Compilação dos ficheiros completos correspondentes aos cenários modelados;
- ❖ Eliminação dos erros detectáveis e afinação de opções de modelação;
- ❖ Exploração das capacidades de simulação oferecidas e ganho de sensibilidade ao modelo.

Fase F - Verificação do modelo:

- ❖ Identificação das anomalias de funcionamento do modelo;
- ❖ Análise de falhas e correcção através de um processo iterativo;
- ❖ Verificação da conformidade dos resultados obtidos com os dados de projecto.

Fase G - Exploração do modelo e planeamento da gestão futura:

- ❖ Definição das potencialidades do modelo para apoio ao projecto e planeamento;
- ❖ Análise hidráulica e avaliação do desempenho técnico;
- ❖ Análise de qualidade da água;
- ❖ Planeamento do desenvolvimento continuado do modelo.

2.4.2 Epanet 2.0

Desenvolvido no ano 2000 pela *U.S Environmental Protection Agency* (USEPA), dos Estados Unidos da América, e adaptado para língua portuguesa, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em 2002. O Epanet é um software do domínio público, distribuído gratuitamente com o propósito de promover entre os profissionais da indústria da água, os consultores, os docentes e os estudantes de engenharia e outras disciplinas técnicas, a divulgação da simulação de sistemas de abastecimento de água.

O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação, de que se destacam como principais características (Rossman, 2000):

- ❖ Dimensão (número de componentes) da rede a analisar ilimitada;
- ❖ Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;

- ❖ Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc;
- ❖ Modelação de bombas de velocidade constante ou variável;
- ❖ Cálculo da energia de bombagem e do respectivo custo;
- ❖ Modelação dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de caudal;
- ❖ Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas através de curvas de volume em função da altura de água;
- ❖ Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- ❖ Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de uma só condição, ou em controlos com condições múltiplas;
- ❖ Modelação do transporte de um constituinte não reactivo através da rede ao longo do tempo;
- ❖ Modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reactivo à medida que este sofre decaimento ou crescimento com o tempo;
- ❖ Cálculo da percentagem de caudal que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo;
- ❖ Definições de limite para a transferência de massa na modelação de reacções na parede;
- ❖ Modelação do tempo de percurso da água através da rede;
- ❖ Modelação de reacções de decaimento do cloro no seio do escoamento em tubagens e reservatórios;
- ❖ Definição da variação temporal da concentração ou da entrada de massa em qualquer ponto da rede.

Apesar das capacidades de modelação apresentados anteriormente, as principais razões que conduziram à sua selecção prendem-se com os seguintes factos:

- ❖ Programa adequado às necessidades actuais de simulação;
- ❖ Utilização livre e gratuita, não havendo qualquer restrição ao seu uso;
- ❖ Utilização universal, software amplamente testado;
- ❖ Integração com ferramentas CAD nomeadamente a aplicação AUTOCAD.

Na figura 5 apresenta-se a configuração do ambiente de trabalho do simulador hidráulico Epanet.2.0. Como é possível observar na figura, o programa e os seus materiais de apoio foram traduzidos para língua portuguesa.

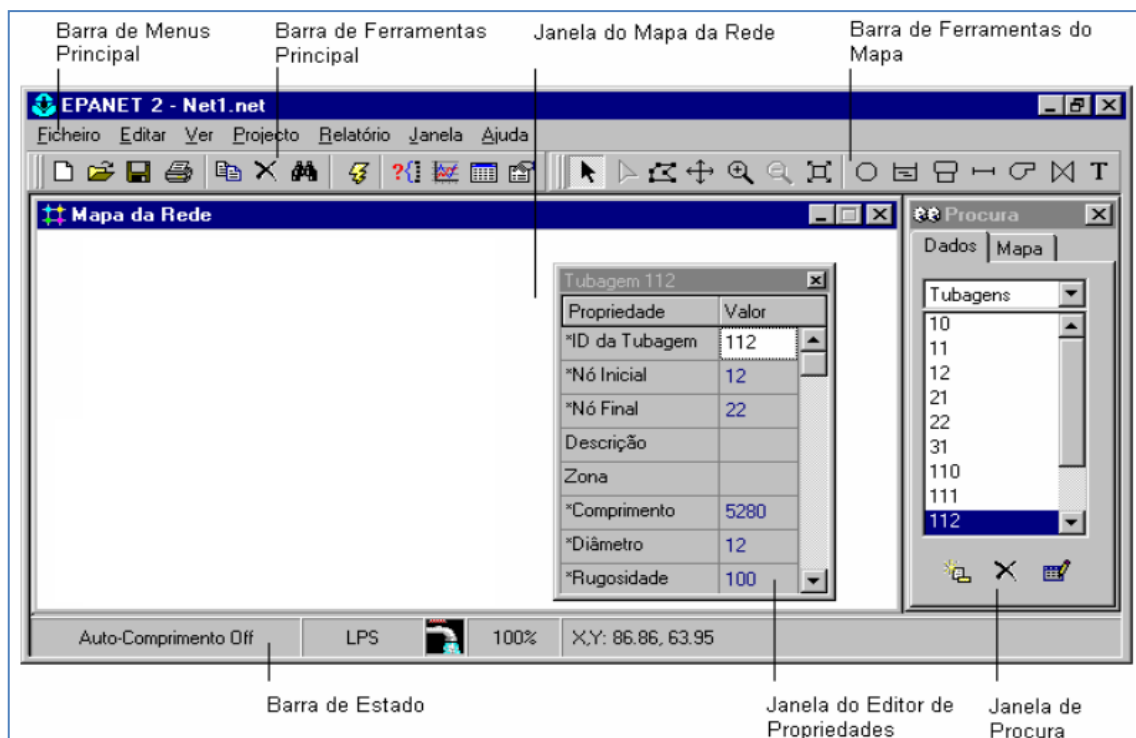


Figura 5 - Ambiente de Trabalho do EPANET 2.0 (Adaptado de Loureiro & Coelho, 2002)

O EPANET modela um SDA como sendo um conjunto de troços ligados por nós, que expressam os componentes seus físicos (Ver figura 6). Os troços representam as tubagens, bombas e válvulas de controlo, enquanto, os nós representam junções, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV).

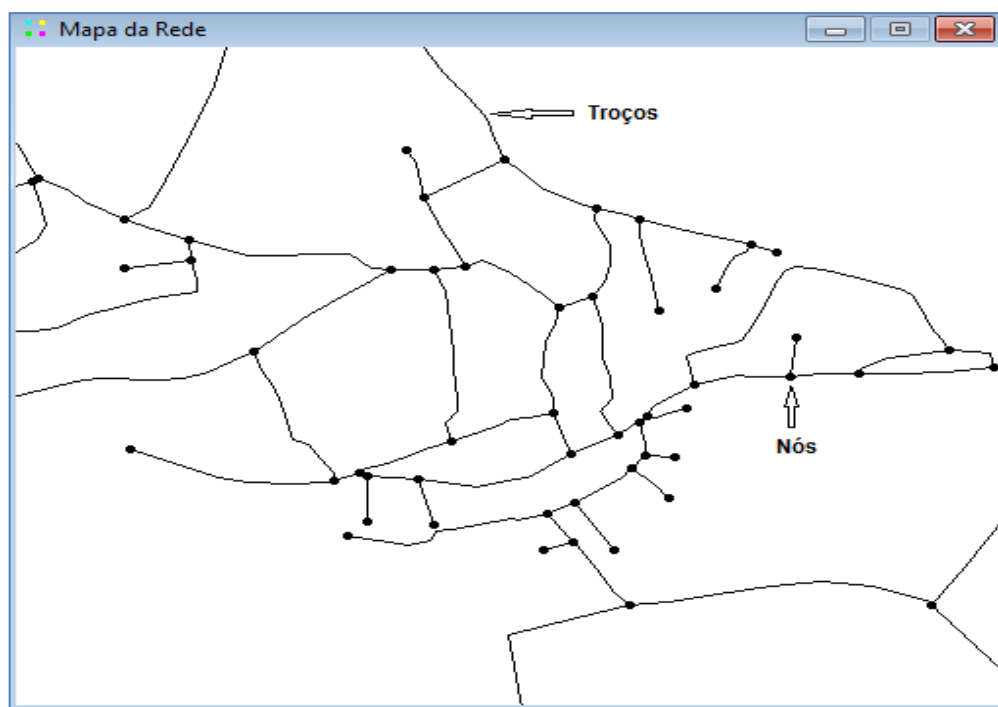


Figura 6 - Representação de um mapa da rede em termos de nós e troços - EPANET 2.0

Na modelação de um SDA, através do EPANET, utiliza-se tipicamente os seguintes passos Loureiro & Coelho, 2002:

1. Desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição ou importar uma descrição-base do sistema a partir de um ficheiro de texto;
2. Editar as propriedades dos objectos que constituem o sistema;
3. Descrever as condições de operacionalidade do sistema;
4. Seleccionar um conjunto de opções de simulação;
5. Executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;
6. Visualizar os resultados da simulação.

2.4.3 Consumos

Na concepção de um modelo computacional existem diversos métodos para a definição de valores nominais para cada nó (designados por consumo-base). De entre os diversos métodos, apresentam-se 3 formas de definir o consumo-base nos nós:

1. A partir da análise da informação cartográfica;
2. Recorrer à construção de tabelas de correspondência entre os valores registados no sistema de facturação e os nós do modelo;
3. Realizar uma ligação funcional entre o sistema de facturação, o sistema de informação geográfica e o modelo, de modo a serem contabilizados os consumos associados aos nós do modelo.

Por simplificação, na distribuição de valores nominais para cada nó é estipulado que os consumos que ocorrem em cada semi-comprimento de uma conduta são concentrados no nó respectivo, como é possível observar na Figura 7.

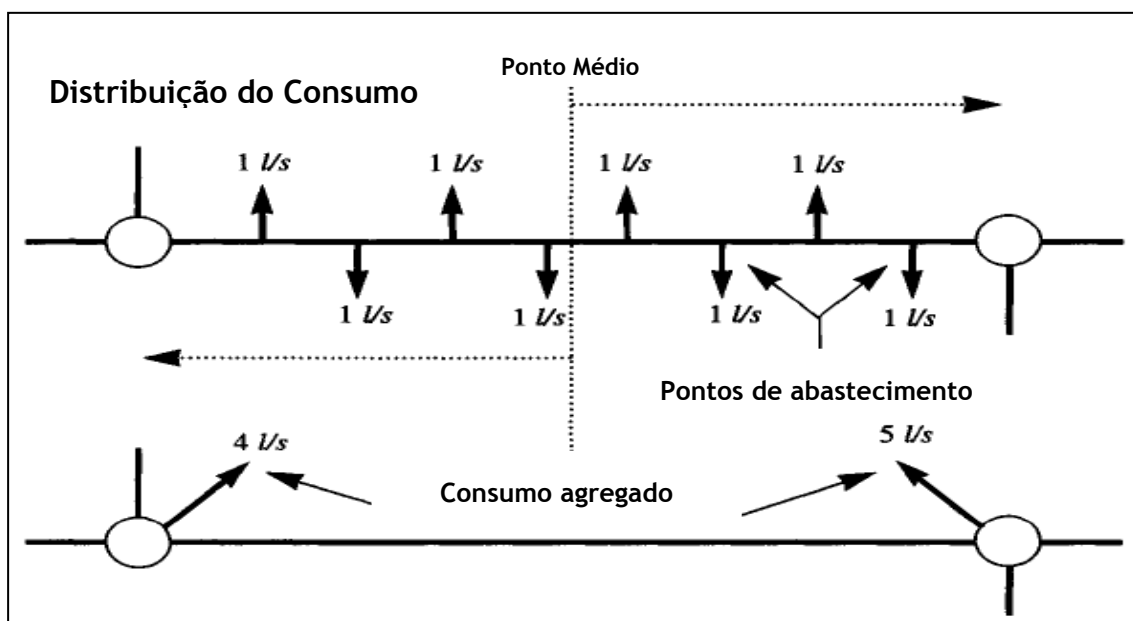


Figura 7 - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (Adaptado de Ormsbee *et al*, 1989)

O número de ramal, código do cliente, nome do cliente, classe de consumo, descrição do consumo e ainda o volume de água facturado por ano em m³ por cliente, são alguns exemplos de informações respeitantes aos consumos facturados numa rede de distribuição de água, que um cadastro de uma entidade gestora pode dar a conhecer.

2.4.4 Calibração

Calibrar um modelo computacional consiste em garantir que este representa, de forma fiável e válida, nas mais variadas formas, o comportamento da rede de distribuição real em causa e assim assegurar que ela pode ser utilizada com confiança.

Segundo Herrin 2001, a calibração é um processo essencial, de modo a garantir:

- ❖ A credibilidade - a calibração demonstra a capacidade do modelo para reproduzir as condições existentes, conseqüentemente o aumento de credibilidade na capacidade do modelo, traduz-se numa melhor previsão de condições futuras;
- ❖ A compreensão - a calibração de um modelo traduz-se no conhecimento do funcionamento do sistema, familiarizando assim o modelador na análise do sistema quando lhe são introduzidas alterações;
- ❖ A detecção de problemas - um dos benefícios da calibração é o de se corrigir deficiências na informação introduzida no modelo.

Mesmo após a obtenção de resultados (grandezas que representam o comportamento hidráulico de um SDA, como por exemplo o caudal e a pressão) no modelo computacional, a calibração só é concluída depois da comparação desses com as respectivas medidas directamente no campo.

De acordo com a Water Research Center (1989), os principais critérios relativos à calibração de pressões são:

- ❖ 85% dos valores medidos na rede deverão satisfazer a maior das duas tolerâncias: $\pm 0,50$ m ou $\pm 5\%$ da maior perda de carga verificada na rede;
- ❖ 95% dos valores medidos na rede deverão satisfazer a maior das duas tolerâncias: $\pm 0,75$ m ou $\pm 7,5\%$ da maior perda de carga verificada na rede;
- ❖ 100% dos valores medidos na rede deverão satisfazer a maior das duas tolerâncias: ± 2 m ou $\pm 15\%$ da maior perda de carga verificada na rede.

Por outro lado, a American Water Works Association (1999), apresenta como valores mínimos para a calibração hidráulica de sistemas de distribuição de água (varia consoante a sua área de intervenção e o grau de rigorosidade) os critérios apresentados na Tabela 3.

Na Tabela 3, o nível de detalhe representa a simplificação da estrutura da rede que o modelo deve conter, o tipo de simulação refere-se à simulação estática ou dinâmica (simulação em período alargado), o número de leituras de pressão indica a percentagem de nós do modelo recomendado a utilizar e por fim mostra-se os valores a respeitar para considerar-se que o modelo está calibrado. Nota-se que estes valores a utilizar na calibração, variam consoante a área de intervenção do modelo.

Tabela 3 - Programas de modelação hidráulica (Vidigal, 2008)

Área de intervenção	Nível de detalhe	Tipo de simulação	Nº leituras pressão	Relação à pressão simulada
Planeamento	Baixo	Estática ou Dinâmica	10%	±3.5 m em 100%
Remodelação	Medio a elevado	Estática ou Dinâmica	5% - 2%	±1.4 m em 90%
Exploração	Baixo a elevado	Estática ou Dinâmica	10% - 2%	±2.1 em 90%
Qualidade	Elevado	Dinâmica	2%	±2.1 em 70%

Mesmo estando em posse de um cadastro actualizado, na fase da concepção de um modelo computacional, não é expectável que depois do processo da calibração o mesmo coincida exactamente com a rede. Este desvio resulta de erros associados ao facto de não ser possível conhecer todas as solicitações a que a rede está sujeita.

De acordo com Alegre 1992 e 1994, os erros mais frequentemente detectados num processo de calibração resultam da combinação dos seguintes factores:

- ❖ Deficiência de topologia;
- ❖ Erros dos dados sobre o estado de fechamento ou abertura de válvulas;
- ❖ Erros humanos na introdução de dados;
- ❖ Estimativa incorrecta das rugosidades das condutas;
- ❖ Diminuição de secção das condutas por incrustações;
- ❖ Estimativa deficiente dos grandes consumos;
- ❖ Existência de obstruções ao escoamento desconhecidos.

Um modelo computacional pode ser criado na fase de projecto, no processo de remodelação ou mesmo depois do sistema de distribuição estar em funcionamento para efeito de exploração. A calibração do modelo é mais importante quando esse for utilizado para exploração do SDA.

2.5 Perda de Água

Perante a crescente procura de água, ganha força a necessidade do homem controlar, nas redes de distribuição, as perdas do seu recurso natural mais precioso.

Não existem sistemas de distribuição de água 100% eficazes, pelo que a ocorrência de perdas de água é inevitável. A sua redução é um dos principais desafios com que as entidades gestoras dos serviços de Abastecimento de Água se enfrentam actualmente na maioria dos países. As perdas elevadas têm, acima de tudo, dois efeitos negativos relevantes. Por um lado, representam desperdício de recursos naturais (consequências ambientais) e, por outro lado, constituem uma parcela significativa no custo de produção (consequências económicas).

A frequência de ocorrência de roturas, o estado de conservação das tubagens e elementos acessórios, o tipo de solo e condições de assentamento das tubagens, o uso ilegal de água, erros de medição e a pressão em excesso na rede (situação mais frequente) são os principais factores que influenciam as perdas de água nos SDA.

As diversas melhorias relativas aos instrumentos de detecção e localização de fugas, ocorridas no decorrer dos anos 90 do século passado, correspondem a uma importante etapa no que diz respeito à diminuição do caudal perdido nos SDA, dado que esse facto possibilitou uma melhor compreensão da relação pressões/fugas. Pois, quanto maior for a pressão interna existente na rede, maior é a frequência de fugas e roturas por sobrepressão nas juntas e articulações da mesma.

Nos últimos anos, têm vindo a ser estudadas e desenvolvidas várias técnicas de contabilização, controlo, gestão, detecção e localização de fugas em sistemas de distribuição de água. Contudo, devido à ambiguidade existente quanto aos conceitos e aos formatos de cálculo, várias entidades gestoras identificaram a necessidade urgente de uma terminologia comum a nível internacional. Nesse sentido, a *International Water Association (IWA)* produziu uma abordagem normalizada do balanço hídrico, com definições claras de todos os termos envolvidos (Farley & Trow, 2003).

Na tabela 4 apresentam-se os diferentes tipos de perdas existentes numa rede de distribuição de água e o modo como estas se relacionam.

Tabela 4 - Componentes do balanço hídrico (Adaptado - Alegre *et al.*, 2005)

Água entrada no sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo facturado medido (incluindo água exportada)	Água facturada
			Consumo facturado não medido	
		Consumo autorizado não facturado	Consumo não facturado medido	Água não facturada (perdas comerciais)
			Consumo não facturado não medido	
	Perdas de água	Perdas aparentes	Uso não autorizado	
			Perdas de água por erros de medição	
		Perdas reais	Perdas reais nas condutas de água bruta e no tratamento (quando aplicável)	
			Fugas nas condutas de adução e/ou distribuição	
			Fugas e extravasamentos nos reservatórios de adução e/ou distribuição	
			Fugas nos ramais de ligação (a montante do ponto de medição)	

Seguidamente, são descritos os conceitos mais relevantes, relativos aos componentes do balanço hídrico:

Água entrada no sistema - volume de água introduzido num SDA ao longo de um ano.

Consumo autorizado - volume anual de água fornecido a consumidores registados, a outros que estejam implícita ou explicitamente autorizados a fazê-lo para usos domésticos, comerciais ou industriais e à própria entidade gestora (incluindo a água exportada). Também pode fazer parte do consumo autorizado, a água utilizada para combate a incêndio, lavagem de condutas e colectores, lavagem de ruas, rega de espaços verdes municipais, alimentação de fontes e fontanários, protecção contra congelação, fornecimento de água para obras. Importa ainda salientar que é considerado como parte do consumo autorizado, toda e qualquer “perda de água” resultante de fugas e/ou desperdícios, por parte de clientes registados.

Perdas de água - correspondem à diferença entre o volume de água que entra no SDA e o consumo autorizado. As perdas de água dividem-se em perdas reais e perdas aparentes. As perdas de água podem ser calculadas para todo o sistema ou para subsistemas, como sejam a rede de água não tratada, o sistema de adução, o sistema de distribuição ou zonas do sistema de distribuição.

Água não facturada - equivale à diferença entre a água entrada no sistema e do consumo autorizado facturado. Como é visível na Tabela 4, água não facturada inclui não só as perdas de água, mas também o consumo autorizado não facturado.

2.5.1 Perdas Reais e Perdas Aparentes

Como já foi referido anteriormente, as perdas de água subdividem-se em perdas reais e perdas aparentes.

Apesar dos dois tipos de perdas serem importantes e influenciarem a facturação final de uma entidade gestora, apenas as perdas reais obrigam a um aumento do volume de água introduzido no sistema de distribuição, de modo a satisfazer a procura. Isto justifica-se, pelo facto das perdas aparentes existirem no papel e as reais serem físicas.

Para um plano de redução de perdas, num sistema de distribuição de água, as perdas aparentes devem ser estudadas em conjunto com as perdas reais, visto ser mais fácil quantificar as perdas reais quando são conhecidas as perdas aparentes.

As **Perdas reais** representam todo o volume de água correspondente às perdas físicas, desde o instante que ela entra no sistema de distribuição até ao contador do cliente. O volume anual de perdas através de todos os tipos de fissuras, roturas e extravasamentos depende da frequência, do caudal e da duração média de cada fuga.

As **Perdas aparentes** contabilizam todos os tipos de imprecisões associadas às medições da água produzida e da água consumida, e ainda o consumo não autorizado (por furto ou uso ilícito).

Os registos por defeito dos medidores de água produzida, bem como registos por excesso em contadores de clientes, levam a uma subavaliação das *perdas reais*. As perdas físicas a jusante do contador do cliente podem contribuir significativamente para o aumento das perdas aparentes (Alegre *et al.*, 2005).

2.5.2 Vulnerabilidade de um Sistema

Quando a totalidade dos componentes constituintes de uma infraestrutura hidráulica se encontram em serviço, é possível garantir aos consumidores o abastecimento pretendido. Porém, a ocorrência de falhas em algum dos componentes internos do sistema (vulnerabilidade), associados aos perigos externos inerentes, podem por em causa a integridade de um sistema de distribuição e levar, inclusivamente, a roturas/fugas de água.

A integridade do sistema de distribuição pode ser de diferentes naturezas:

- ❖ Integridade física, associada à existência de uma barreira física entre o interior do sistema e o ambiente exterior;

- ❖ Integridade hidráulica, relativa à manutenção de valores aceitáveis de caudal, de pressão e de tempo de permanência da água no sistema, assegurando o abastecimento de água e o serviço de combate a incêndios;
- ❖ Integridade da qualidade da água, relativa à manutenção da qualidade final da água que é distribuída.

Para a análise de vulnerabilidade de sistemas hidráulicos é importante verificar a influência de 3 factores: 1) propriedade estrutural da conduta, 2) carga interna e externa e 3) deterioração do material:

- 1. Propriedade Estrutural da Conduta:** tipo de material, diâmetro, comprimento, idade, interacção do solo/conduta e qualidade da instalação;
 - ❖ **Material da Conduta** - Conduitas de material tipo plástico de grandes dimensões são mais passíveis de sofrer rupturas do que as de metal. Contudo, nas conduitas de fibrocimento e de betão existe maior deterioração devido aos vários processos químicos que ocorrem nestes materiais;
 - ❖ **Diâmetro** - As conduitas com diâmetros inferiores a 200mm apresentam maior probabilidade de falha, devido à reduzida resistência. Conduitas com maior diâmetro são menos susceptíveis ao movimento do solo devido ao tráfego, pois são mais pesadas e apresentam uma maior área de sustentação do que de menor diâmetro;
 - ❖ **Comprimento** - Sistemas longos de conduitas (> 100 m) podem sofrer diferentes reacções devido a cargas externas, aumentando o risco de falha. Por outro lado, sistemas pequenos de conduitas (< 100m) exigem maior numero de juntas, aumentando a possibilidade de contaminação;
 - ❖ **Idade** - A probabilidade de ruptura aumenta com a idade das conduitas independentemente do material.

- 2. Cargas Internas e Externas:** devido à pressão de serviço, sobrecarga do solo e do tráfego, alteração da temperatura e tráfego;
 - ❖ **Pressão Interna** - Pressão estática e variações de pressão podem levar à ruptura da conduta. Para qualquer que seja o tipo de material, é maior a vulnerabilidade da rede, nas secções junto aos equipamentos hidromecânicos;
 - ❖ **Pressão Externa** - Conduitas enterradas poderão sofrer tensões longitudinais e transversais, principalmente em solos argilosos, que sofrem grandes alterações de volume. As conduitas que sofrem maior deterioração apresentam uma maior probabilidade de falha do que as conduitas que sofrem interferência de terceiros.

- 3. Deterioração do Material:** devido às interações externas (movimentos do solo) e interações internas (químicas e bioquímicas). A deterioração do material tem como efeito a diminuição da capacidade hidráulica, na degradação da qualidade da água e na diminuição da resistência estrutural em caso de corrosões internas.

3 Válvulas Redutoras de Pressão

3.1 Válvulas redutoras de Pressão nos Sistemas de Distribuição

São denominadas de *perdas de distribuição*, as perdas de água resultantes de fugas nos ramais prediais e na rede de distribuição. Apesar de ser nos ramais prediais onde se verifica o maior número de fugas, em termos de volume de água perdido, ela é maior nas condutas da rede de distribuição. A magnitude da perda será tanto maior, quanto maior for o estado de degradação da rede, principalmente nos casos de pressões elevadas.

As fugas dependem de diversos factores, sendo, a pressão na rede de abastecimento o mais facilmente controlável e conseqüentemente, o controlo da pressão é a forma mais eficaz de redução dos volumes de água perdido durante as fugas. Face ao exposto, e pelo facto das válvulas redutoras de pressão serem umas das melhores alternativas para a uniformização, controlo das pressões (ver Figura 8), torna-as em um dispositivo essencial para a gestão operacional de um sistema de distribuição de água.

Podendo ser controladas de modo a funcionarem não apenas para um único valor de pressão, as válvulas redutoras de pressão permitem um controlo mais eficiente dos níveis de serviço (DIAS, 2004).

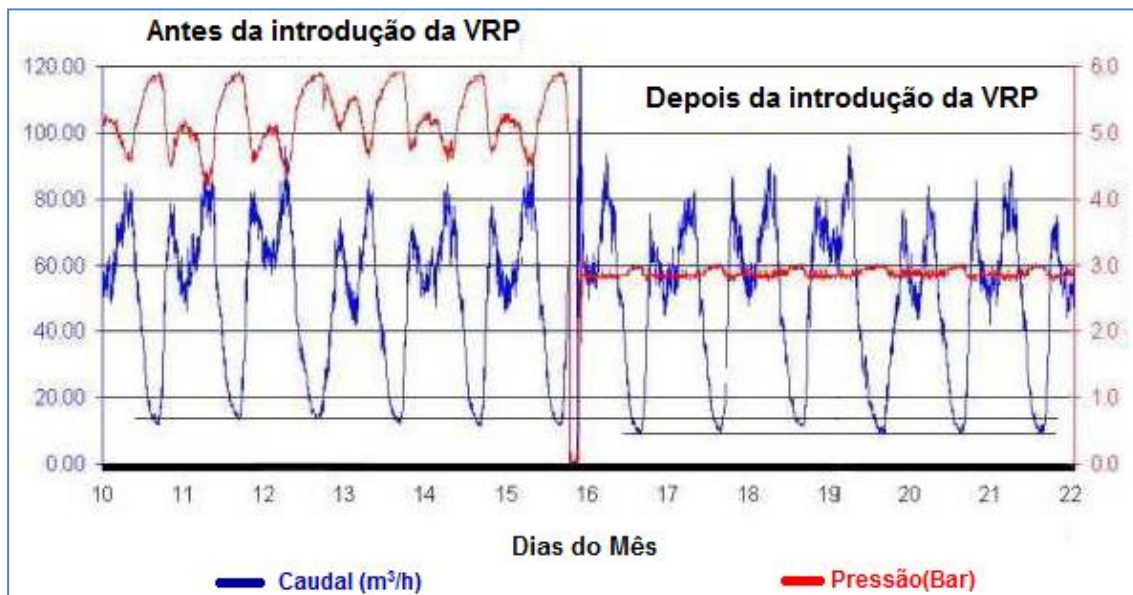


Figura 8 - Efeito da introdução de uma VRP no controlo da pressão (Adaptado de Charalambous, 2005)

Para além da redução do volume de água perdido durante as fugas, a introdução de uma VRP num SDA:

- ❖ Reduz o próprio número de ocorrência de roturas;

- ❖ Reduz o consumo relacionado directamente com a pressão, nas situações de lavagem de carros e calçadas e irrigação de jardins;
- ❖ Diminui a possibilidade de fadiga das condutas, inclusive nas redes domésticas de abastecimento;
- ❖ Contribui para um abastecimento constante à população (grandes variações de pressão ao longo do dia podem induzir um abastecimento deficiente).

3.1.1 Pressão Regulamentar em Portugal

Os critérios para o dimensionamento hidráulico, para a maioria dos SDA, baseiam-se nos mesmos princípios. Porém, cada projectista tem de respeitar parâmetros estabelecidos nas normas vigentes, no país onde o sistema está inserido. Em Portugal, o valor mínimo obrigatório relativo à pressão de serviço, a verificar na rede pública e ao nível do arruamento, é definida em função da altura média dos edifícios a serem abastecidos sem a utilização de bombas, e este é definido no Decreto-Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto.

$$H = 10 + 4 n \quad (1)$$

Onde: H: pressão mínima de serviço;

n : número de pisos acima do solo incluindo o piso térreo.

Há que manter sempre uma pressão mínima de serviço de forma a garantir o abastecimento às populações e evitar depressões na rede, que possam causar instabilidade hidráulica ou permitir a contaminação do sistema, comprometendo a qualidade da água na rede.

No mesmo Decreto-Regulamentar, é feita uma imposição de 60 m relativo ao valor da pressão máxima, estática ou de serviço, a assegurar em qualquer ponto de consumo. Esta imposição está directamente relacionada com as características dos materiais a instalar. Em termos de exploração, uma rede que funciona a pressões superiores, às necessárias para garantir o seu correcto funcionamento, é passível de apresentar um maior risco de rotura dos diversos componentes e um valor de perdas superior.

Este regulamento não define como satisfazer os limites estabelecidos, sendo que estas decisões são da responsabilidade dos projectistas, que utilizando as potencialidades da modelação matemática dos sistemas de abastecimento de água, devem analisar as várias alternativas possíveis. Note-se que, para garantir os valores acima referidos, as válvulas reductoras de pressão são ferramentas amplamente utilizados pelos projectistas.

A flutuação de pressão nos SDA não deve ser significativa. As mudanças bruscas de pressão aumentam a frequência do aparecimento de novas roturas e reduzem a vida útil média da infra-estrutura de abastecimento de água.

Importa salientar que, apesar de este parâmetro ser um dos mais fáceis de monitorizar, algumas entidades gestoras, inclusive a do presente caso de estudo, ainda não realiza a monitorização continua da pressão.

3.1.2 Válvulas Redutoras na criação Zonas de Medição e Controlo

A divisão do total da área de uma rede de distribuição (sectorização do sistema de abastecimento), em subsistemas denominados de Zonas de Medição e Controlo (ZMC), com um único ponto de entrada e saída de água, onde são realizadas medições com vista ao controlo da pressão e do escoamento, é uma das principais estratégias de minimização de fugas utilizado pelas entidades gestoras.

O principal objectivo da criação das ZMC's prende-se com a necessidade de reduzir as perdas para níveis economicamente aceitáveis e com a manutenção destes níveis mediante a aplicação de medidas proactivas no combate às perdas.

Existem inúmeras vantagens associadas à criação de sectores de abastecimento, nomeadamente:

- ❖ As áreas dentro do sistema de abastecimento são mais reduzidas, logo mais fáceis de controlar;
- ❖ A introdução de medidas de combate a perdas de água torna-se mais fácil;
- ❖ As fugas de água são identificadas mais rapidamente;
- ❖ Em caso de fuga, o tempo de perda de água é muito menor;
- ❖ Menores perdas de água;
- ❖ Redução dos encargos financeiros associados às perdas de água.

Na prática, as zonas de medição e controlo, são sectores do sistema de distribuição com fronteiras bem definidas que podem ocorrer naturalmente ou podem ser criadas através do fecho de determinadas válvulas (Duarte, 2009). Na Figura 9 apresenta-se um exemplo de um sistema de medição zonada, com 3 zonas principais, estando a ZMC1 subdividida em 3 subzonas de medição.

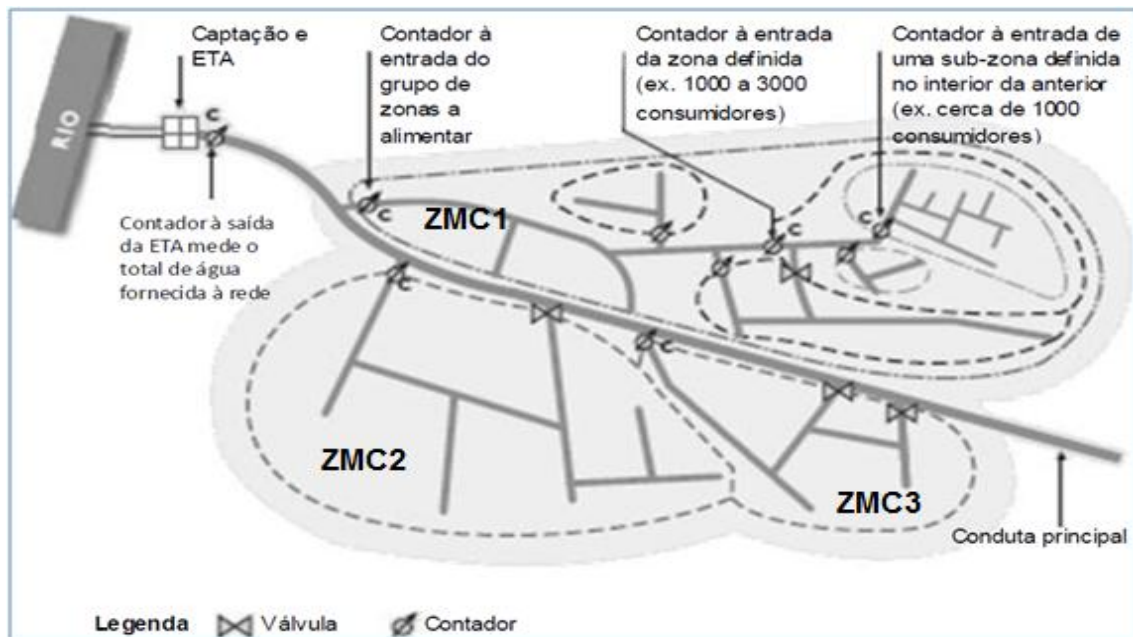


Figura 9 - Esquema hierárquico das ZMC's e opções de constituição das mesmas (Antunes *et al.*, 2005)

A delimitação destes sectores de distribuição de água pode ser feita em função das condicionantes físicas, urbanas e topográficas da cidade, bem como das pressões máxima e mínima de trabalho desejáveis para a rede.

A sectorização facilita, através da introdução válvulas redutoras de pressão, a gestão das pressões e a detecção dos sectores que têm uma maior probabilidade de apresentar fugas (perdas reais) e de modo geral possibilita um melhor controlo operacional de toda rede. Contudo, o isolamento dos diferentes sectores gera algumas situações desfavoráveis para o abastecimento, designadamente, uma diminuição do número de alternativas de abastecimento, criação de pontos extremos adicionais na rede, alteração do sentido do escoamento, modificação da velocidade do escoamento.

3.2 Funcionamento das Válvulas Redutoras de Pressão

As válvulas de controlo automático são órgãos instalados nas redes com diferentes finalidades, como por exemplo:

- ❖ Impedir ou estabelecer a passagem de água em qualquer dos sentidos - válvula de seccionamento;
- ❖ Impedir a passagem de água num dos sentidos - válvula de retenção;
- ❖ Permitir a regulação do caudal - válvula de regulação;
- ❖ Manter a pressão abaixo de determinado valor por efeito de segurança - válvula de segurança;
- ❖ Manter a pressão abaixo de determinado valor com introdução de perda de carga - válvula redutora de pressão;

Quanto ao modo de funcionamento, as válvulas de controlo automático podem ser divididas em dois grandes grupos:

1. Válvulas do tipo globo com controlador interno e actuador hidráulico;
2. Válvulas com controlador externo, actuando em função da medição directa ou indirecta do caudal;

O primeiro grupo de válvulas caracteriza-se por conter um obturador operado hidraulicamente por um pistão ou por uma membrana, em que uma das faces está em contacto com uma câmara existente na parte superior da válvula. O segundo grupo, caracteriza-se por possuírem um comando do actuador ligado a um regulador electrónico que recebe sinais provenientes dos sensores instalados na válvula.

Em termos práticos, as válvulas de controlo automático encontram-se inseridas em circuitos hidráulicos em que as pressões variam consoante os caudais. Como a válvula ao actuar provoca uma variação no caudal, as pressões no circuito hidráulico irão variar, logo a variação das pressões a montante/jusante das válvulas, são influenciadas pela abertura destas (SILVA, 2004).

Segundo Covas & Ramos (1998), uma válvula redutora de pressão funciona da seguinte forma:

- ❖ Sempre que a pressão a jusante for demasiado elevada é accionado o dispositivo de obturação da válvula, de forma a aumentar a perda de carga localizada no sistema, reduzindo o valor da pressão a jusante até ao valor pretendido (valor designado por carga de definição da válvula redutora de pressão, H_{VRP});
- ❖ Pelo contrário, se a pressão a jusante descer abaixo de um determinado valor pré-definido, a válvula abre e a pressão a jusante atinge o valor pretendido, quando a pressão a montante é superior a este valor. Este modo de funcionamento, em que a válvula provoca uma perda de carga localizada no sistema, reduzindo o valor da pressão a jusante, designa-se por **estado activo** da válvula (i.e., parcialmente aberta);
- ❖ Se a pressão a montante for inferior à definida na VRP, a válvula abre totalmente, mantendo a montante e a jusante a mesma pressão a menos da perda de carga localizada introduzida pela válvula aberta - **estado passivo com a válvula aberta**. Com o objectivo de minimizar a perda de carga localizada intrínseca à válvula aberta, a mesma deverá ser dimensionada de modo que a sua capacidade, para a abertura total, seja superior ao caudal de dimensionamento do sistema;
- ❖ Sempre que, por qualquer razão, a pressão a jusante seja superior à pressão a montante, a válvula fecha totalmente funcionando como uma válvula de retenção que impede a inversão do escoamento, caracterizando assim o **estado passivo da válvula fechada**.

O esquema apresentado na Figura 10 caracteriza os 3 modos de funcionamento de uma VRP anteriormente referidos. Onde, (i) esquematiza o estado activo de uma VRP, (ii) o estado passivo com a VRP aberta e a (iii) o estado passivo da VRP fechada.

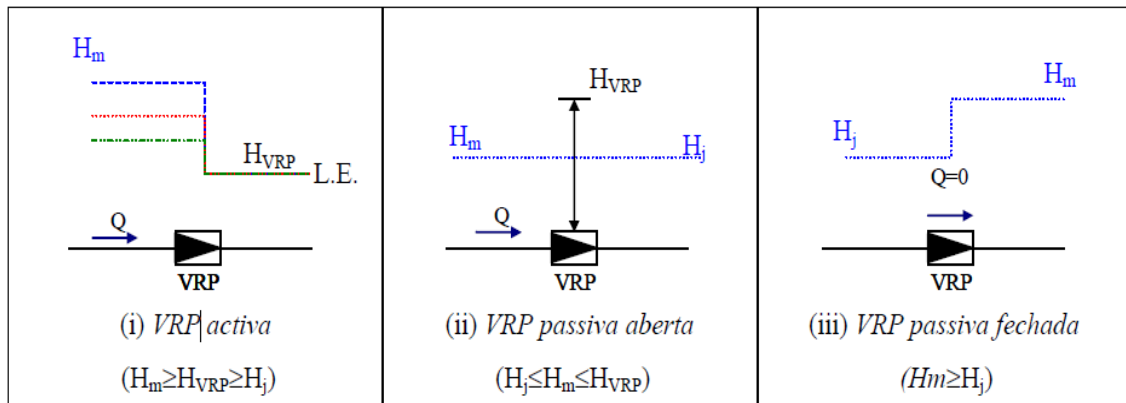


Figura 10 - Funcionamento de uma Válvula Redutora de Pressão (Covas & Ramos, 1998)

A possibilidade de numa VRP poder-se trabalhar para um único valor de pressão, mas também para vários patamares de pressão, definidos em função da variação de consumo, garante uma melhor gestão dos níveis de serviço e um melhor desempenho hidráulico do sistema. Existem, fundamentalmente, quatro sistemas de funcionamento de válvulas redutoras de pressão (Covas & Ramos, 1998):

VRP com carga constante - A válvula reduz e estabiliza a pressão a jusante da mesma, mantendo a pressão constante e igual a um determinado valor, pré-estabelecido (H_{VRP}), qualquer que seja a pressão a montante e o débito de caudal no sistema (Figura 11- (i)).

VRP com queda constante - Neste sistema, a válvula reduz a pressão a jusante da mesma, mediante a introdução de uma perda de carga localizada constante independente da pressão a montante, pelo que a pressão a jusante da válvula varia com a pressão a montante, mantendo constante o diferencial entre ambas, ΔH (Figura 11 - (ii)).

VRP com carga constante variável no tempo - O comportamento deste sistema é semelhante ao da VRP com carga constante a jusante, porém, a pressão é mantida constante por intervalos no tempo pré-definidos, variando de intervalo para intervalo (Figura 11 - (iii)).

A situação mais comum é a utilização de dois patamares de pressão: um para o período diurno e outro para o nocturno.

VRP com carga ajustável automaticamente em função da variação dos consumos - A válvula reduz a pressão a jusante em função do caudal debitado ou da variação de pressão em secções críticas da rede (secções com menores pressões). Caso a pressão seja regulada pelo caudal é necessário equipar a válvula com um sistema de medição de caudal, para que qualquer variação do mesmo seja acompanhada pela respectiva variação de pressão a jusante.

Caso a pressão a jusante seja controlada pela pressão nas secções críticas, é necessário monitorizar a pressão nessas secções, por um sistema de telegestão, em simultâneo com o accionamento da válvula redutora de pressão (Figura 11 - (iv)).

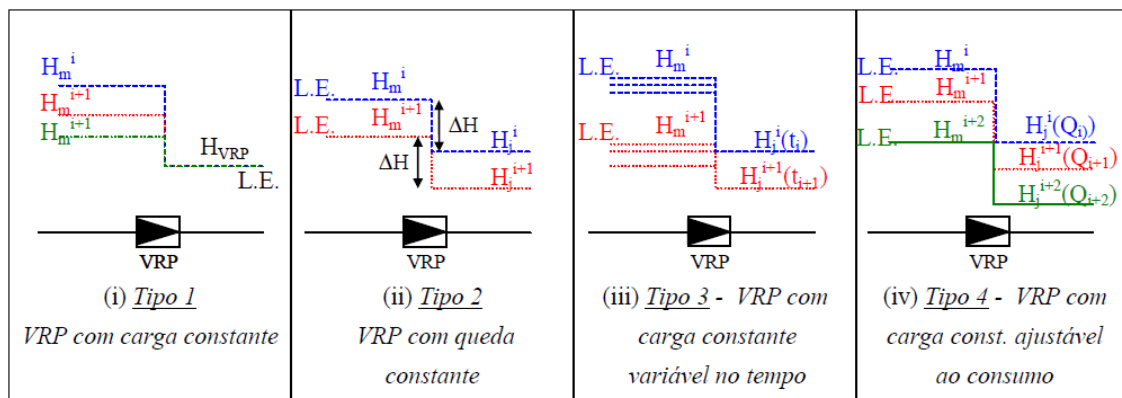


Figura 11 - Funcionamento de diferentes sistemas de VRP (Covas & Ramos, 1998)

O primeiro e o segundo sistema de funcionamento de uma VRP são aplicados essencialmente nas soluções convencionais. Por outro lado, os dois últimos são para redes de distribuição onde existem sistemas redutores de pressão mais complexos. Todavia, desde que convenientemente equipado para tal função, uma válvula pode permitir qualquer um dos diferentes tipos de funcionamento.

Apesar de não ser muita a diferença de comportamento verificada entre as válvulas redutoras de pressão com carga hidráulica a jusante constante e com perda de carga hidráulica constante, a implantação da 1ª conduz a melhores desempenhos hidráulicos. Porém, devido à diferença de custos, pode ser vantajoso adoptar uma VRP com perda de carga hidráulica constante. A decisão, relativamente à melhor alternativa a adoptar, deve em todos os casos ser precedida de um uma análise benefício/custo.

Numa VRP convencional exige que a pressão na rede seja elevada durante a noite para assegurar o nível de serviço mínimo durante a hora de ponta. Por outro lado, uma VRP não convencional, e em especial a VRP regulável pelo caudal, permite que a pressão da rede se ajuste aos consumos ao longo do dia, ajustando a pressão a jusante ao débito de caudal no sistema, ou seja, funcionando com pressões baixas durante as horas de menor consumo, e com pressões mais elevadas durante o período de ponta (Bairos, 2008).

3.2.1 Configuração e comercialização das VRP

Uma válvula redutora de pressão no geral divide-se em duas partes, designadamente, o corpo e o castelo (ou veio):

Corpo - Onde está o orifício de passagem do fluido e as extremidades para ligação a tubagem.

Castelo ou Veio - É a parte superior da válvula (pode ser desmontado para permitir acesso ao interior da válvula). Este pode ser fixado ao corpo da válvula de diferentes formas. Os três sistemas mais comuns são:

- ❖ **Castelo roscado directamente ao corpo** - Sistema menos dispendioso, utilizado apenas para pequenas válvulas, de baixa pressão;
- ❖ **Castelo preso ao corpo por uma rosca do tipo porca** - Utilizado em válvulas pequenas. É uma boa solução para condições de escoamento de média/elevada pressão.
- ❖ **Castelo aparafusado** - Usado para válvulas de grandes dimensões e para qualquer pressão. Permite uma excelente vedação, pelo que é um sistema utilizado em sistemas especiais.

Em termos de materiais, as VRP são fabricadas maioritariamente em:

Bronze fundido - O bronze fundido é utilizado na construção do corpo e da tampa das válvulas de pequenos e médios diâmetros para as válvulas de acção directa e para as válvulas redutoras auto-operadas. Os meios de ligação usados nas válvulas de bronze são as roscas e as flanges.

Ferro fundido - O ferro fundido cinzento é utilizado na construção do corpo e tampa das válvulas de médios e grandes diâmetros e o meio de ligação é a flange.

As peças que constituem o mecanismo interno da VRP são as mais importantes, é devido ao percurso sinuoso que a água é obrigado a percorrer no seu interior que faz delas as mais solicitadas, sofrendo grandes esforços mecânicos. Porém, não podem sofrer desgaste por corrosão ou erosão, nem deformações. Estas peças são construídas com um material de melhor qualidade do que o usado no corpo e o castelo.

Para além, do castelo ser desmontável do corpo, a própria válvula tem de ser desmontável das condutas de modo a permitir uma possível substituição ou restauro. As juntas representam um ponto frágil em qualquer sistema hidráulico, nelas ocorrem diversos problemas relativos a desgastes, acumulação de resíduos e fugas, por isso merecem uma especial atenção.

Existem diversos tipos de juntas para união entre válvulas e condutas, nos casos específicos de válvulas de bronze, as juntas mais utilizadas são feitas com um material composto basicamente de fibras de amianto, capazes de suportar todas as possíveis variações de pressão do escoamento.

No que diz respeito à ligação entre as válvulas redutoras de pressão e as condutas, estas podem ser:

- ❖ **Roscada** - Para as válvulas de bronze ou de ferro fundido tanto para os modelos de acção directa como as do tipo de controlo auto operada (Figura 12).

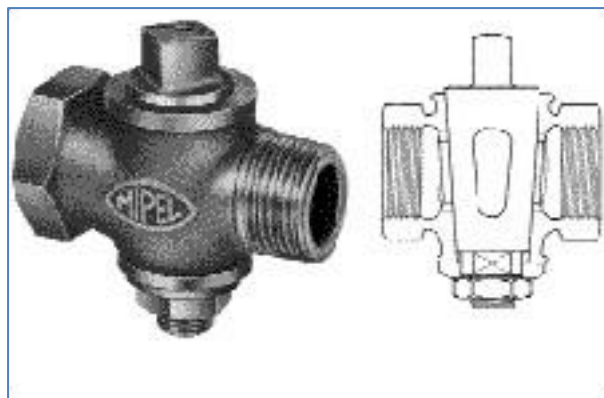


Figura 12 - Válvula com Ligação Roscada (Bello, 2001)

- ❖ **Flangeada** - Para as válvulas de bronze, ferro fundido ou aço, tanto para os modelos de acção directa como para as de controlo auto-operadas (Figura 13).

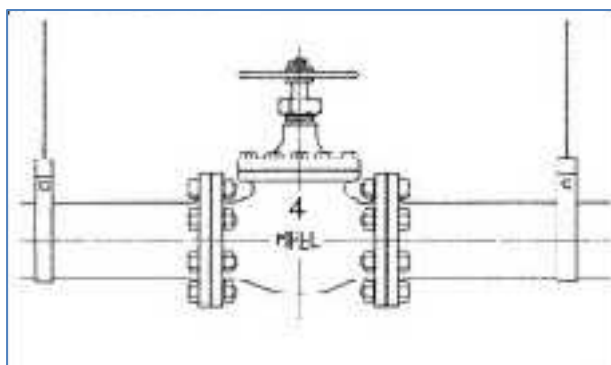


Figura 13 - Válvula com Ligação Flangeada (Bello, 2001)

Em Portugal, as VRP fabricadas em ferro fundido representam a maior percentagem no volume total de venda deste produto, quando comparadas com as fabricadas em bronze.

As VRP com juntas flangeadas são as mais comercializadas no país e em termos de pressão nominal (PN) é possível encontrar no mercado VRP de PN 10, PN 16 ou PN 25.

Relativamente, aos diâmetros elas variam entre 50 e 700 mm (50, 65, 80, 100, 125, 150, 200, 300, 350, 400, 500, 600 e 700 mm)

Na tabela 5, apresentara-se os diâmetros comerciais das válvulas redutoras de pressão comercializadas pela empresa Saint-Gobain PAM Portugal. O preço final da válvula varia em função do diâmetro e da pressão nominal pretendida.

Tabela 5 - Tabela de preços de Válvulas Redutoras de Pressão (Catálogo Saint-Gobain)

Diâmetro Nominal (mm)	Preço (€)	
	PN 10/16	PN 25
50	1350.65	1353.25
65	1412.99	1412.99
80	1555.84	1555.84
100	1657.14	1909.09
125	2028.57	2433.77
150	2150.65	2581.82
200	3036.36	3644.16
250	4602.60	5524.68
300	6690.91	8031.17
350	8207.79	9849.35
40	12724.68	15270.13

3.2.2 Instalação de uma VRP

De modo a oferecer protecção adequada às válvulas redutoras de pressão e também permitir uma maior facilidade de acesso, as válvulas devem ser instaladas em câmaras de manobras.

A montante de uma VRP deve ser instalado um filtro para retenção de areias e a jusante um manómetro ou dispositivo que permita a fácil adaptação do mesmo, para controlo das pressões; Válvulas de seccionamento, a montante e a jusante para facilitar a sua regulação e manutenção periódica. A Figura 14 mostra o processo de construção de uma câmara de manobra para instalação de uma VRP.



Figura 14 - Construção de uma Câmara de Manobras para instalação de uma VRP (<http://www.embasa.ba.gov.br/>, acedido 27/08/2011)

De modo a não prejudicar o abastecimento à população durante a regulação/manutenção periódica ou, em períodos onde seja necessário proceder-se a eventuais reparações na válvula, a rede deve ser dotada de um “by-pass” cuja eficiência é permanentemente assegurada. Em circunstâncias onde existam válvulas redutoras instaladas em paralelo, não é necessária a existência desse tipo de dispositivo.

Na figura 15 apresenta-se, um esquema de um “by-pass”, onde é possível visualizar ainda o posicionamento dos variados componentes que o compõem.

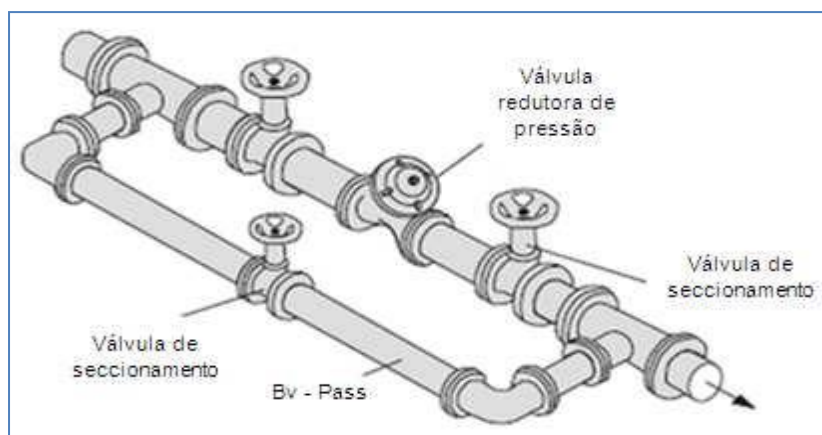


Figura 15 - Exemplo de um “by-pass” (VALLOY, 2002)

4 Caso de estudo

4.1 Caracterização da rede de Distribuição de Água - Verdelhos

Na figura 16 apresenta-se a localização geográfica da freguesia de Verdelhos, situada a norte do concelho da Covilhã, no distrito de Castelo Branco. O sistema de distribuição de água desta freguesia foi objecto de análise ao longo do estudo desenvolvido nesta dissertação.



Figura 16 - Localização da freguesia de Verdelhos (Extracto do mapa de Portugal)

Segundo revelam os dados do XIV Recenseamento Geral da População realizado, em 2001 pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), Verdelhos faz parte de um conjunto de freguesias do meio rural da Beira Interior, onde ao longo dos últimos anos se tem verificado um decréscimo do seu efectivo populacional. Este sintoma de desvitalização demográfica e económica está directamente associado à dinâmica de crescimento verificada nas cidades da Covilhã e Castelo Branco, para onde aflui uma parte considerável da população profissionalmente activa.

Na tabela 6 apresentam-se alguns dados referentes ao Sistema de Abastecimento de Água de do concelho da Covilhã, constituída por 31 freguesias, onde Verdelhos está também inserida representando 1,5 % do total da população servida, com 467 contadores para uma população residente de 875 habitantes.

Tabela 6 - Características do Sistema de Abastecimento da Covilhã

Características do Sistema de Abastecimento	
População Servida no Concelho (Hab. Residentes)	57.500
Origem da Água	Subterrânea e Superficial
Volume de água facturado em 2010 (m ³)	2.475.307
Localização das captações	100% No concelho da Covilhã
Dimensão do Sistema de Distribuição (Km)	478
Capacidade de Reserva Total (m ³)	33.100

O SDA de Verdelhos é de captação subterrânea e é caracterizado por altitudes que variam entre os 550 m (menor valor de cota topográfica verificada na rede) e os 650 m, contribuindo para isso a grande variação topográfica que se verifica nessa região do país (Figura 17).



Figura 17 – Fotografia panorâmica da localidade de Verdelhos

Na figura 18 apresenta-se o mapa de isolinhas de cotas topográficas da rede de distribuição da freguesia de Verdelhos, extraído do Epanet 2.0. O reservatório de distribuição encontra-se no ponto mais elevado da rede aos 650 metros.

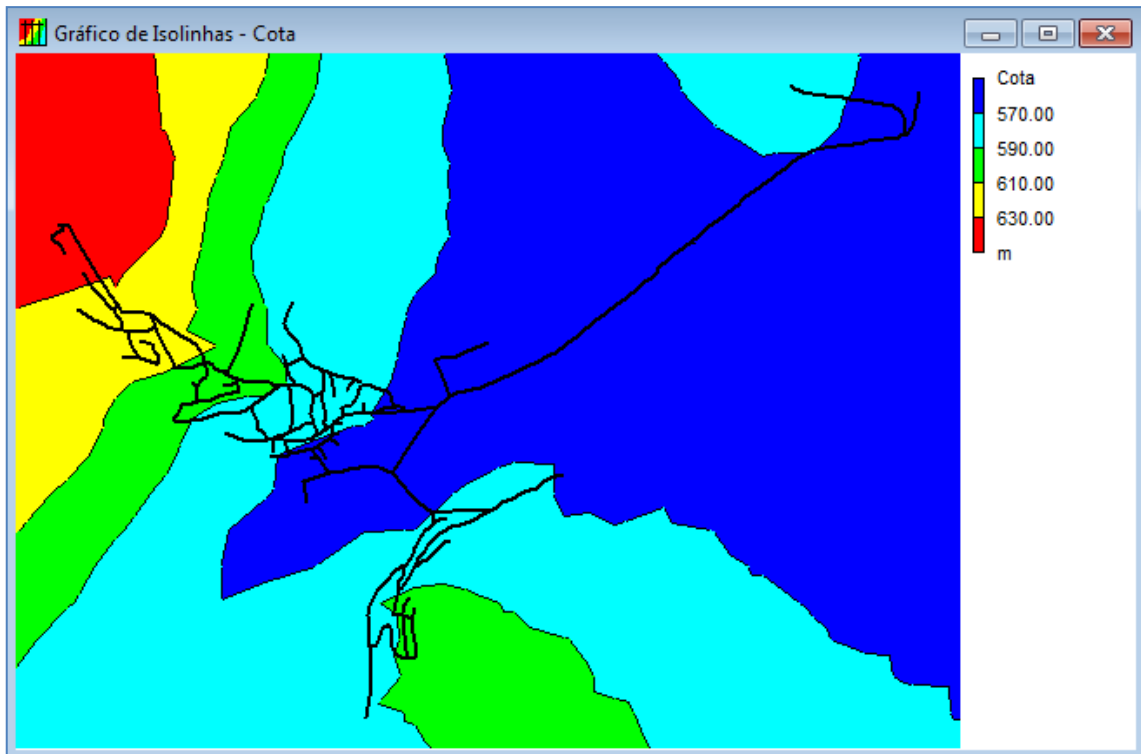


Figura 18 - Gráfico de isolinhas de cotas topográficas do SDA de Verdelhos - Extraído do EPANET 2.0

Componentes do sistema de distribuição:

- ❖ Poço de captação;
- ❖ Estação e conduta elevatória;
- ❖ Estação de tratamento com reservatório de armazenamento de 100 m³;
- ❖ Adutora gravítica;
- ❖ Reservatório de distribuição de 100 m³.

Nas figuras 19 e 20 apresentam-se a estação de tratamento/reservatório de armazenamento e o reservatório de distribuição de água, respectivamente.



Figura 19 - Estação de tratamento e reservatório de armazenamento de 100 m³



Figura 20 - Reservatório de distribuição de 100 m³

Na figura 21 apresenta-se o esquema de implantação da rede de distribuição de Verdelhos e a disposição dos seus pontos de consumo. No SDA de Verdelhos existem pontos de consumo com elevados valores médios de consumos. Estes pontos representam os Fontanários e Lavadores públicos existentes ao longo da Rede de Distribuição.

Na modelação computacional da rede não foram considerados os componentes do sistema de distribuição, localizados a montante do reservatório de distribuição, nomeadamente o poço de captação, as condutas elevatórias, o reservatório de armazenamento e a adutora gravítica. Essa simplificação não influencia os resultados do estudo em questão já que ela se baseia na distribuição de água a partir do reservatório de distribuição até aos pontos de consumo.

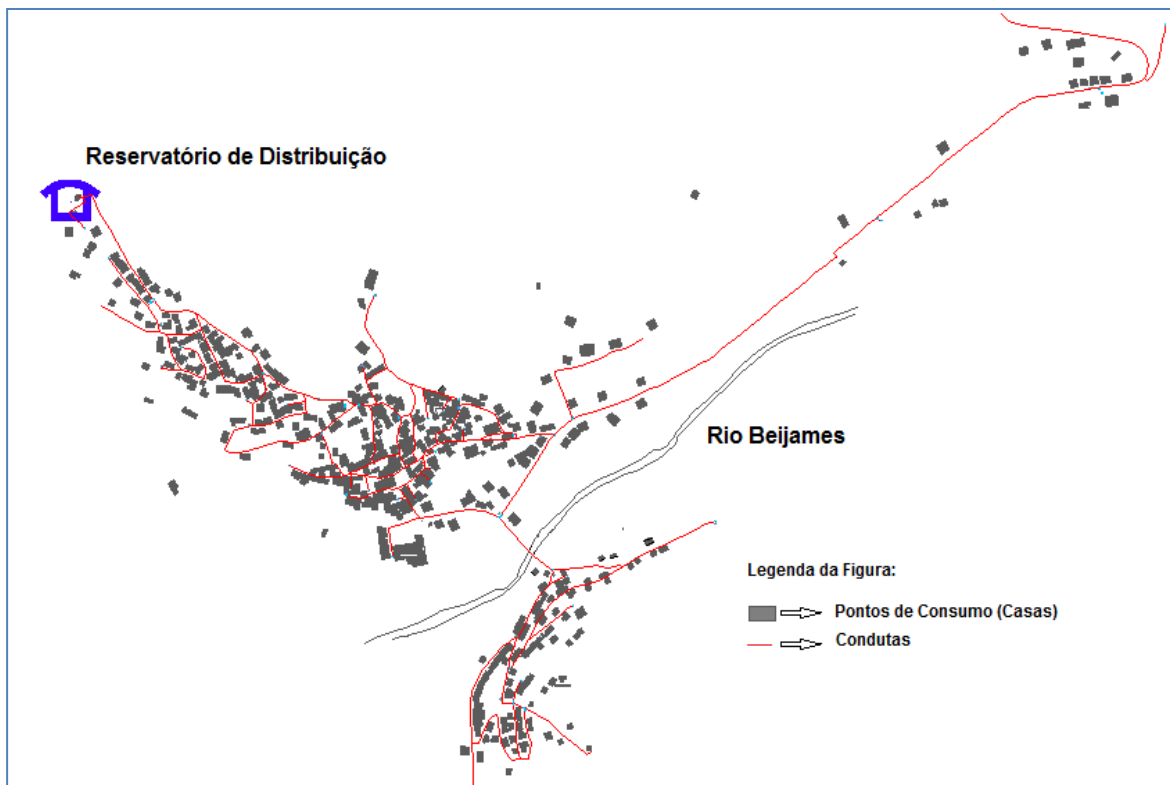


Figura 21 - Esquema de implantação da Rede de Distribuição de Água de Verdelhos

Segundo o cadastro fornecido pela empresa Pública Municipal ADC, as condutas datam de 1987 e são em Policloreto de Vinilo (PVC) em toda a extensão da rede. Na tabela 7 apresenta-se, para além do material utilizado nas condutas, a variação de diâmetro existente e os comprimentos de tubagem correspondente a cada diâmetro.

Tabela 7 - Características das condutas da rede de distribuição

Material e diâmetro (mm)	Comprimento (m)
PVC 63	6327,34
PVC 75	867,59
PVC 90	544,10

4.2 Calibração do modelo de exploração

4.2.1 Considerações gerais

A calibração será tanto mais afinada quanto maior o número de grandezas e de observações forem utilizadas. Para o processo de calibração realizaram-se medições de campo das pressões, em 21 nós de um total de 99 existentes em toda rede de distribuição. Os nós escolhidos para a realização destes registos de campo fornecem uma visão global do funcionamento de toda a rede.

As pressões foram medidas durante 2 horas com intervalos de tempo de 15 minutos, das 9h às 11h, correspondente ao período de maior consumo:

Tabela 8 - Pressões medidas na rede

Nós	Pressões Médias (m)
10	88,65
20	82,85
120	72,50
160	67,93
180	60,25
220	79,00
230	85,50
320	69,88
420	70,58
480	51,25
490	49,10

Tabela 8 (Continuação) - Pressões medidas na rede

Nós	Pressões Médias (m)
540	64,88
550	70,30
570	63,72
650	49,50
660	42,50
760	21,00
830	22,33
870	61,63
880	54,48
1000	73,25

Para a escolha dos locais de medições de pressões existem várias abordagens possíveis, tendo-se optado neste estudo pelo método clássico, que se baseia em localizar os medidores de pressão perto de locais com concentrações de consumos e em zonas periféricas da rede, longe dos pontos de abastecimento de forma a aumentar a sensibilidade das perdas de carga aos caudais (Coelho *et al.*, 2006)

Na figura 22 apresentam-se os locais de medição das pressões utilizados na calibração do modelo.

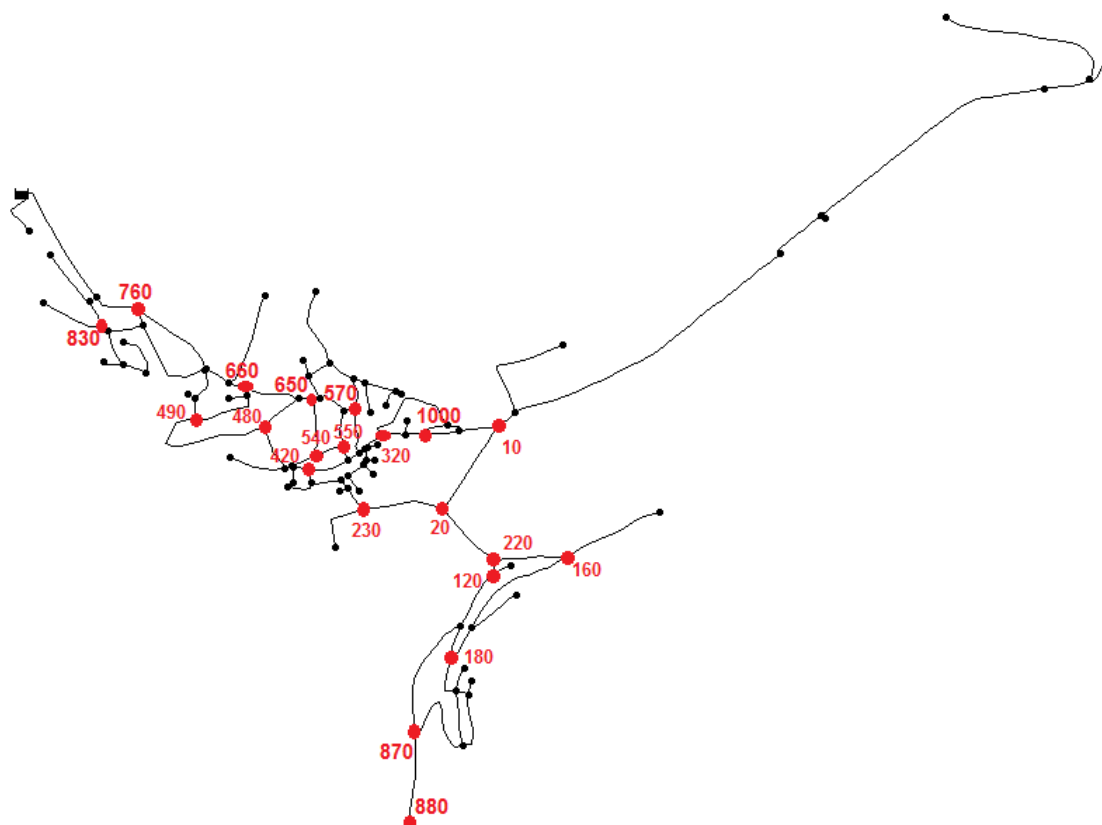


Figura 22 - Indicação dos locais de medição de pressões utilizados na calibração - EPANET 2.0

4.2.2 Concepção do Modelo da Rede de Distribuição de Verdelhos

Como referido anteriormente, para a modelação da rede de distribuição foi utilizado a versão 2.0 do simulador hidráulico EPANET.

A concepção do modelo teve por base um levantamento topográfico da freguesia de Verdelhos, levado a cabo pela Entidade Gestora ADC, onde a rede de distribuição e todos os seus componentes foram representados.

Antes que uma rede de distribuição possa ser modelada e simulada, o sistema físico deve ser representativo da rede e representá-la de modo a que seja possível analisá-la computacionalmente (Simulador Hidráulico). Para se obter a representação do traçado da rede exclusivamente em termos de troços (tubagens) e nós (definindo-se nós como sendo todas as intersecções de dois ou mais troços) e conseguir uma correcta conversão do ficheiro de dados do software de desenho AutoCAD (formato. dwg), para o programa de simulação hidráulica EPANET 2.0 (ficheiro de projecto. NET), houve necessidade de fazer algumas alterações e simplificações dos dados fornecidos.

Segundo Alegre 1992, os dados de entrada necessários para modelar um sistema de distribuição de água dependem, naturalmente, do simulador adoptado. Porém, há um conjunto de informação de base que é requerida por todas as formulações, nomeadamente:

- Em relação à geometria do SDA:

- ❖ Comprimentos, diâmetros internos e rugosidades que caracterizam os troços;
- ❖ Cotas topográficas dos nós.

- Em relação a outros elementos:

- ❖ Cotas do nível de água no reservatório;
- ❖ Parâmetros de cálculo das perdas de carga.

No subcapítulo 2.4.1, esquematizam-se as diferentes fases adoptadas no desenvolvimento do modelo utilizado na realização do presente caso de estudo.

4.2.3 Definição de Consumos Facturados

Relativamente aos registos de consumos, a ADC apenas dispõe do volume de água facturado em m³ por áreas de facturação.

O modelo da rede de distribuição contém 114 troços e 99 nós. Salienta-se que, o cadastro fornecido pela entidade gestora distribui o volume água facturado na rede, por 51 áreas de facturação como mostra a Figura 23. As áreas de facturação não representam o número de troços, nem o número de arruamentos da freguesia.

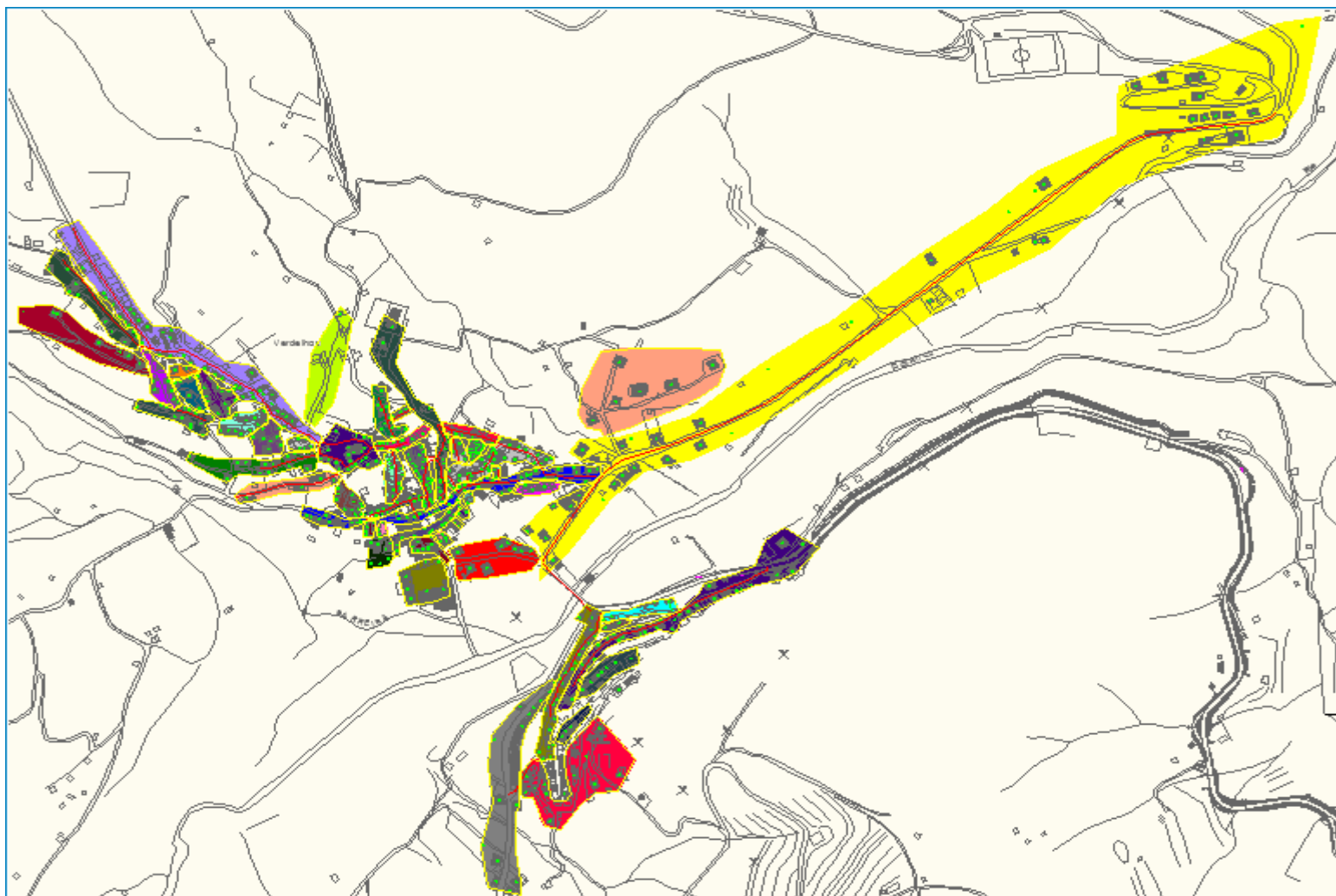


Figura 23 - Áreas de facturação de consumo de água na freguesia de Verdelhos - ADC

A caracterização do consumo do SDA de Verdelhos teve por base as leituras realizadas pela ADC em 2010. De modo a caracterizar os consumos ao longo da rede, e proceder à distribuição do consumo pelos nós, foi aplicado o segundo método descrito no subcapítulo 2.4.3 (Tabela de correspondência entre valores registados no sistema de facturação e os nós do modelo).

Para além disso, existe o dobro de condutas quando comparadas com as áreas de facturação. Este facto, faz com que em alguns casos o número de troços e nós afectos a cada área de facturação seja muito grande, tornando muito complexa a atribuição percentual do consumo-base para cada nó.

Cada área de facturação é denominada por letras do alfabeto latino, como é possível observar no anexo II, onde se apresentam as distribuições percentuais do consumo aos nós afectos a cada uma das áreas de facturação.

Na tabela 9 apresenta-se, a título de exemplo, a atribuição percentual do consumo referente aos 15 nós afectos a cada área de facturação “Q” (Área representada a amarelo na Figura 23).

Tabela 9 - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final

Área de Facturação	Consumo (m ³)	Nós	Consumo	
			%	(m ³)
Q	1284	10	0,04	51,36
		280	0,08	102,72
		290	0,06	77,04
		300	0,08	102,72
		320	0,15	192,6
		330	0,06	77,04
		420	0,06	77,04
		440	0,00	0,00
		460	0,06	77,04
		470	0,08	102,72
		530	0,00	0,00
		580	0,04	51,36
		950	0,08	102,72
		960	0,06	77,04
		1000	0,15	192,6

A distribuição percentual pelos nós, do volume de água anual consumido, em cada área de facturação, pode conduzir a uma atribuição por excesso ou por defeito do volume definido para cada nó, levando a que a perda de carga calculada ao longo da conduta esteja subestimada ou sobrestimada.

Ainda assim, a simplificação é aconselhável, permitindo a obtenção de modelos menos complexos, reduzindo o volume de trabalho na sua construção. Mesmo existindo alguma discrepância ela não é significativa.

4.2.4 Simulação em Período Alargado

A simulação em período alargado ou simulação dinâmica não difere da simulação estática no que diz respeito às informações geométricas básicas requeridas. No entanto, no que concerne aos consumos é indispensável dispor por medição ou por estimativa, da curva de consumo em diversos nós da rede durante o período de simulação.

Após a definição do padrão de consumo, é possível avaliar o consumo em cada nó, para determinada hora, como o resultado do produto do consumo-base no nó pelo valor do padrão de consumo escolhido, nessa mesma hora, traduzido pela relação:

$$q_t^i = P^t \times q_i \quad (2)$$

Em que q_t^i é o consumo no nó i no instante t , P^t é o valor do padrão de consumo no instante t e q_i é o consumo-base no nó i .

Com o objectivo de abranger a variação temporal do consumo da rede em estudo optou-se por realizar uma simulação dinâmica. Para representar essa variação temporal do consumo, procedeu-se ao levantamento da pressão num ponto da rede de distribuição durante o período compreendido entre vinte e cinco de Junho e quinze de Julho de 2010, com um espaçamento temporal de 15 minutos entre cada medição. O tratamento estatístico dos dados foi realizado com o auxílio de uma folha de cálculo MS Excel e foi fornecido pela ADC.

Na figura 24 apresenta-se o padrão de consumo (variação temporal) do SDA de Verdelhos, gerado através do tratamento estatístico da série de dados obtido recolhidos no terreno.

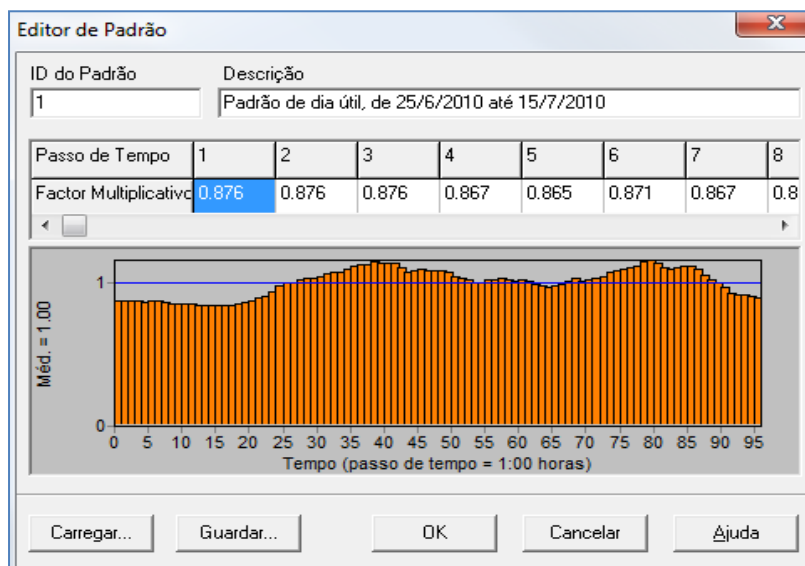


Figura 24 - Padrão de consumo da Rede de Distribuição - EPANET 2.0

Regra geral, as perdas de água na rede são maiores durante o período nocturno, altura do dia onde se registam maiores valores de pressão devido ao menor consumo e menor durante o período diurno quando as pressões são menores. Contudo, através da análise da Figura 24

pode concluir-se que o consumo de água nessa rede é incaracterístico, dado não existir grandes diferenças entre os períodos de menor e maior consumo.

Através da análise dos volumes de água obtidos em cada nó da rede aliado a um conhecimento das características físicas, houve a necessidade de diferenciar o padrão de consumo dos grandes consumidores acima referidos dos restantes pontos de consumo.

Para estes consumidores foi definido um padrão unitário visto que o consumo de água é constante, ou seja, não varia ao longo do dia. Na Figura 25 representa-se o padrão de consumo para os grandes consumidores (Fontanários e Lavadores Públicos).

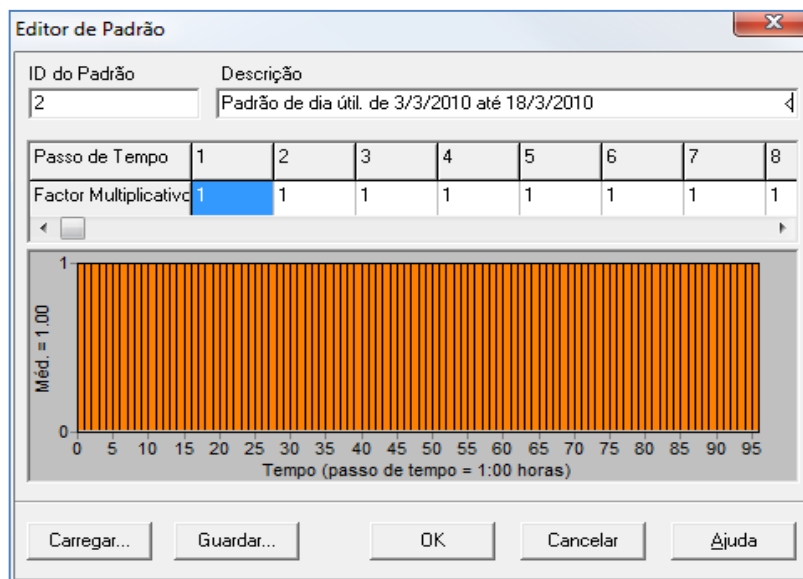


Figura 25 - Padrão de consumo unitário (Para Grandes Consumidores) - EPANET 2.0

De modo a facilitar a análise de sensibilidade, as simulações dos cenários para calibração e os ensaios de fugas, em cada nó foi efectuado o carregamento de consumo-base dimensional e a atribuição de padrões temporais adimensionais (Ver Anexo II).

4.2.5 Opções de Simulação Hidráulicas e de Tempos

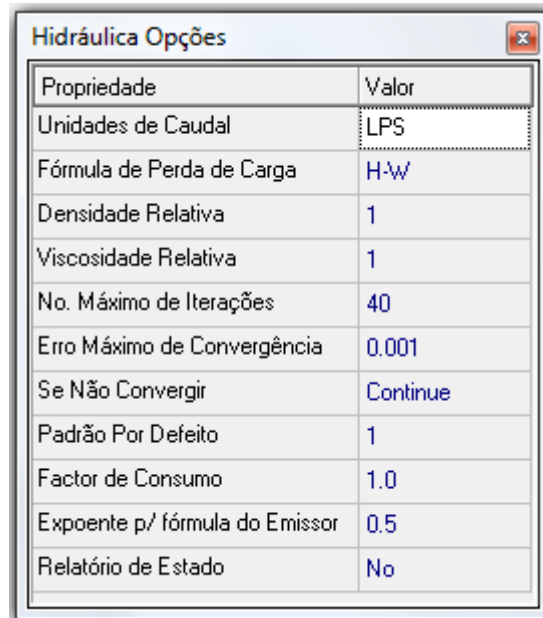
Na simulação dinâmica é possível controlar variáveis de simulação através das opções hidráulicas e de tempo estabelecidas, pois o estudo do comportamento hidráulico de sistemas de distribuição baseia-se na resolução de equações básicas de equilíbrio hidráulico.

A equação Darcy-Weisbach com diagrama é Moody considerada a forma mais precisa para estimar perdas de carga, todavia este estudo não demanda uma abordagem tão exacta. Deste modo, optou-se por uma fórmula empírica amplamente testada, que alia uma grande facilidade de aplicação com obtenção de resultados igualmente fiáveis.

De entre as fórmulas empíricas disponíveis, a fórmula Manning foi preterida em relação à fórmula de Hazen-Williams, visto que ela é mais dirigida para canais.

Na figura 26, apresenta-se uma tabela com um “output” do Epanet 2.0, onde é possível observar as opções hidráulicas consideradas no presente caso de estudo para a simulação do modelo computacional.

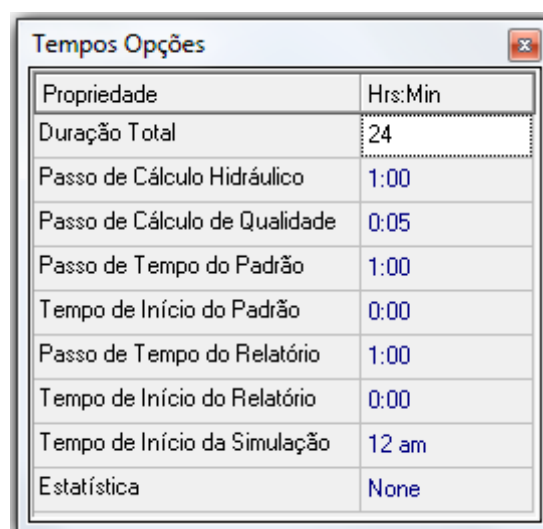
De entre outras opções hidráulicas definidas, salienta-se que o sistema de unidades utilizada foi o sistema internacional (SI), o número máximo de iterações para resolução das equações não lineares para obtenção de equilíbrio foi 40 e a unidade de caudal foi l/s.



Propriedade	Valor
Unidades de Caudal	LPS
Fórmula de Perda de Carga	H·W
Densidade Relativa	1
Viscosidade Relativa	1
No. Máximo de Iterações	40
Erro Máximo de Convergência	0.001
Se Não Convergir	Continue
Padrão Por Defeito	1
Factor de Consumo	1.0
Expoente p/ fórmula do Emissor	0.5
Relatório de Estado	No

Figura 26 - Opções Hidráulicas adoptadas no simulador - EPANET 2.0

As opções de tempo servem para definir todos os espaços de tempo a utilizar no decorrer da simulação dinâmica, nomeadamente, a duração total da simulação, o intervalo de tempo para cálculo hidráulico, o intervalo de tempo para definição do padrão da curva de consumos, entre outros como é possível observar na figura 27.



Propriedade	Hrs:Min
Duração Total	24
Passo de Cálculo Hidráulico	1:00
Passo de Cálculo de Qualidade	0:05
Passo de Tempo do Padrão	1:00
Tempo de Início do Padrão	0:00
Passo de Tempo do Relatório	1:00
Tempo de Início do Relatório	0:00
Tempo de Início da Simulação	12 am
Estatística	None

Figura 27 - Opções de tempo adoptadas no simulador - EPANET 2.0

4.2.6 Cenários para Análise de Sensibilidade

Tal como já foi referido no segundo capítulo, nem toda a água que circula na rede de distribuição é efectivamente facturada pela entidade gestora. Esta parcela de água não registada, representada pelo resultado da diferença entre o volume de água introduzido na rede e o volume de água facturada, é denominada por volume de água não facturada.

A tabela 10 apresenta o volume total de água introduzido no reservatório de distribuição da freguesia de Verdelhos pela ADC, no decorrer do ano de 2010, a quantidade de água facturada no balanço do mesmo ano e do volume de água não facturada pela empresa.

Tabela 10 - Calculo dos Volumes de água facturado e não facturada

	Volumes	
	m ³ /ano	l/s
Água a saída do reservatório	159007,7	5,04
Água Facturado pela ADC	33313,0	1,06
Água não facturada	125694,7	3,99

A análise da tabela 10 permite verificar que a fracção de água não facturada na rede corresponde a cerca de 79 % do volume total de água à saída do reservatório de distribuição, com intuito de abastecer os consumidores dessa rede.

Nesta fase do processo de calibração, após a distribuição do consumo facturado pelo SDA, fez-se uma análise de sensibilidade da rede com intuito de conhecer o modo como o volume de água não facturado está realmente distribuído pelos nós. Para isso foram simuladas diversas soluções de forma a conceber um modelo calibrado e fiável para aplicações futuras.

Relembra-se que até então não se tem uma visão clara, sobre em que pontos da rede estão concentradas o volume de água não facturado que sai do reservatório de distribuição. Facto que obriga a que o processo de calibração seja iterativo.

Seguidamente, serão expostas 5 cenários estudados, onde para cada um deles varia essencialmente a forma como o consumo está distribuído pelos nós, essa incidência no consumo justifica-se essencialmente no facto da entidade gestora não facturar 79% do volume de água que a mesma introduz na rede.

Em cada cenário analisado será apresentado o respectivo Relatório de Calibração (RC) obtido através do simulador hidráulico Epanet 2.0. Em cada nó utilizado na calibração é possível analisar o número de observações de pressão, a média das pressões observadas na rede, a média das pressões simuladas, o erro médio, o desvio padrão e a correlação entre os valores médios, esse relatório é a comparação entre as pressões medidas na rede e as obtidas na simulação.

Ao longo da apresentação dos cenários analisados será feita uma discussão dos resultados obtidos, visto que as conclusões formuladas num cenário serviram de base à concepção do cenário subsequente.

❖ **Cenário 1 (Cenário Base)**

Após a construção do modelo realizou-se uma análise do funcionamento da rede, considerando como o consumo-base dos nós apenas o volume de água facturada no sistema de distribuição. Deste modo, para o cenário base não foi considerada a quantidade de água efectivamente fornecida à rede já que nela não foi tido em consideração o volume não facturado, mas somente aquele debitado/facturado pela ADC. A figura 28 mostra o relatório de calibração, para a pressão, obtido para o cenário base.

Localização	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N220	1	79.50	86.40	6.902	
N120	1	72.50	79.90	7.401	
N180	1	60.00	69.90	9.901	
N870	1	61.50	71.90	10.401	
N160	1	67.10	75.90	8.801	
N880	2	54.05	60.90	6.851	
N1000	1	74.00	80.92	6.921	
N320	1	70.00	77.93	7.926	
N230	1	86.00	85.90	0.096	
N20	1	83.00	88.90	5.904	
N10	1	88.80	89.91	1.110	
N650	1	49.50	56.96	7.464	
N570	1	63.72	66.95	3.235	
N540	1	64.50	70.96	6.460	
N420	1	71.00	74.96	3.958	
N550	1	70.60	74.96	4.355	
N760	1	21.00	26.08	5.078	
N480	1	52.00	58.97	6.970	
N660	1	42.50	47.01	4.507	
N490	1	49.00	55.01	6.007	
N830	1	22.00	27.09	5.089	
Rede	22	61.65	67.65	6.008	6.491

Correlação entre Valores Médios: 0.990

Figura 28 - Relatório de calibração para o cenário 1 - EPANET 2.0

O relatório de calibração mostra uma grande disparidade entre os valores da pressão observados e os simulados. Como seria previsível, os dados obtidos no RC permitem constatar

que, a generalidade dos nós, apresentam valores de erro muito superiores aos valores definidos na subsecção 2.4.4. As pressões simuladas são bastante superiores às observadas na rede, dado que advêm do facto de ser menor a quantidade de água considerada na mesma (não inclui as perdas de água no sistema de distribuição).

❖ Cenário 2

Neste cenário, para além da água facturada foi distribuído de igual forma, por todos os nós da rede, o volume não facturado pela ADC. Na figura 29 apresenta-se o relatório de calibração obtido.

Localização	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N220	1	79.50	81.20	1.703	
N120	1	72.50	74.70	2.196	
N180	1	60.00	64.67	4.674	
N870	1	61.50	66.67	5.171	
N160	1	67.10	70.68	3.580	
N880	2	54.05	55.67	1.625	
N1000	1	74.00	76.02	2.016	
N320	1	70.00	73.10	3.103	
N230	1	86.00	80.89	5.112	
N20	1	83.00	83.82	0.822	
N10	1	88.80	84.86	3.942	
N650	1	49.50	52.80	3.298	
N570	1	63.72	62.61	1.113	
N540	1	64.50	66.71	2.207	
N420	1	71.00	70.67	0.335	
N550	1	70.60	70.62	0.022	
N760	1	21.00	23.53	2.530	
N480	1	52.00	54.87	2.869	
N660	1	42.50	43.58	1.076	
N490	1	49.00	51.57	2.574	
N830	1	22.00	24.65	2.652	
Rede	22	61.65	63.16	2.466	2.843

Correlação entre Valores Médios: 0.992

Figura 29 - Relatório de calibração para o cenário 2 - EPANET 2.0

A comparação dos dois cenários permite verificar que o erro médio de ≈ 6 , obtido no cenário base, diminui para $\approx 2,5$ no cenário 2, o que seria expectável uma vez que no primeiro cenário não se incluía no consumo-base dos nós a água não facturada. No entanto, o cenário 2

apresenta pontualmente valores de pressão muito superiores aos verificados no terreno (como é possível verificar nos nós assinalados no rectângulo a amarelo).

❖ Cenário 3

No cenário 3 procedeu-se à distribuição do consumo não facturado por toda a rede, com maior incidência sobre os nós 10, 160, 180, 230, 650 e 870, uma vez que estes nós apresentaram uma maior discrepância entre os valores de pressão observados e simulados no cenário anterior. Assim, a distribuição do consumo não facturado foi realizado do seguinte modo:

- 50% Foi repartida de modo equitativo (16,67%) pelos 6 nós indicados na Figura 30.
- 50% Foi distribuído de igual forma pelos outros 93 nós existentes na rede.

A figura 30 apresenta a localização dos pontos 10, 160, 180, 230, 650 e 870, na rede de distribuição.

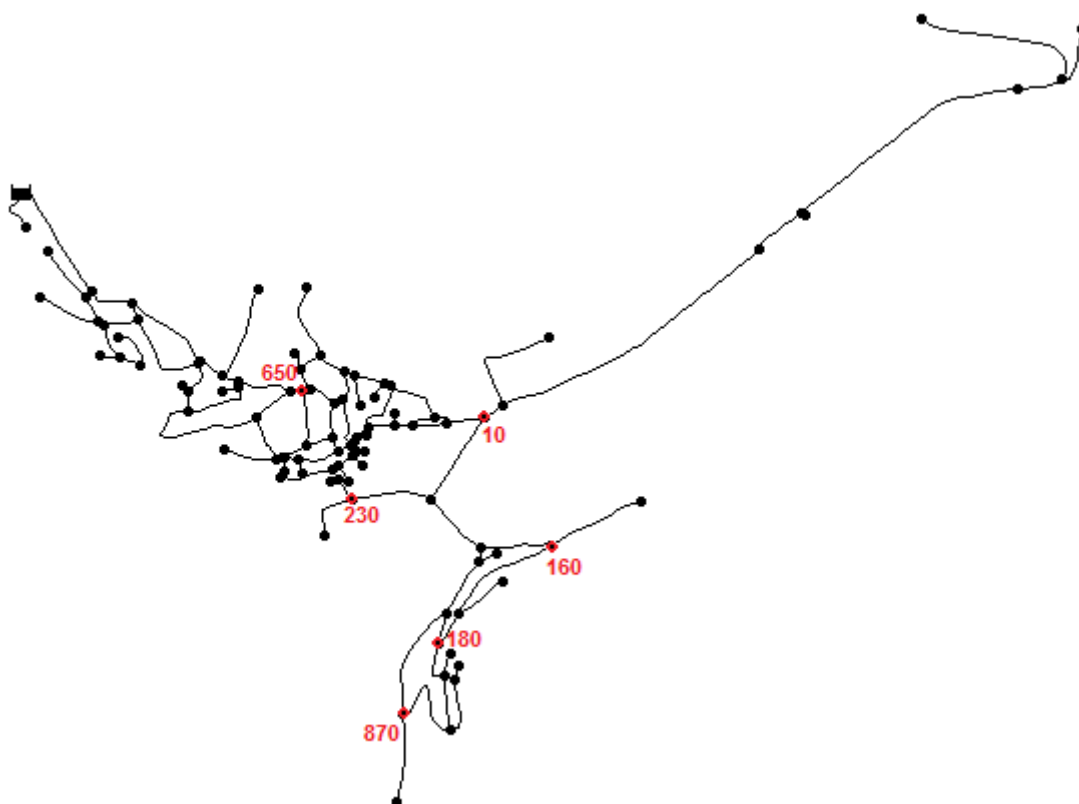


Figura 30 - Locais de distribuição de 50% do volume de água não facturado no cenário 3 - EPANET 2.0

Na Figura 31 apresenta-se o relatório de calibração obtido no cenário 3.

Localização	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N220	1	79.50	79.93	0.433	
N120	1	72.50	73.41	0.911	
N180	1	60.00	63.33	3.328	
N870	1	61.50	65.31	3.807	
N160	1	67.10	69.34	2.236	
N880	2	54.05	54.31	0.644	
N1000	1	74.00	75.21	1.209	
N320	1	70.00	72.37	2.370	
N230	1	86.00	79.88	6.123	
N20	1	83.00	82.72	0.276	
N10	1	88.80	83.85	4.954	
N650	1	49.50	52.38	2.884	
N570	1	63.72	62.16	1.563	
N540	1	64.50	66.28	1.784	
N420	1	71.00	70.23	0.770	
N550	1	70.60	70.17	0.431	
N760	1	21.00	23.46	2.458	
N480	1	52.00	54.50	2.496	
N660	1	42.50	43.38	0.876	
N490	1	49.00	51.37	2.374	
N830	1	22.00	24.61	2.614	
Rede	22	61.65	62.39	2.054	2.540

Correlação entre Valores Médios: 0.993

Figura 31 - Relatório de calibração para o cenário 3 - EPANET 2.0

Uma análise comparativa entre os valores obtidos nos relatórios de calibração dos dois cenários anteriores (2 e 3), é possível observar que o erro médio de cada nó variou de forma distinta, enquanto para alguns nós o valor do erro diminuiu para outros aumentou.

Realçando os nós que apresentavam maior erro médio no cenário 2, é possível averiguar que para este cenário de distribuição de água, nos nós 160, 180, 650 e 870 houve um decréscimo no valor médio do erro, todavia para os nós 230 e 10 com o aumento da quantidade de água o seu erro médio também aumentou.

Comparativamente ao cenário 2, nos nós 180, 650 e 870, apesar dos valores da pressão simulada terem baixado para valores mais próximos dos observados na rede, eles ainda apresentam valores de erro médio elevados (acima do valor aceitável para a calibração definido na subsecção 2.4.4.).

❖ Cenário 4

Tendo em consideração a conclusão extraída da simulação do cenário 3, e tendo em vista a optimização da solução para o cenário 4, adoptou-se a distribuição da água não facturada apresentada na Tabela 11. Esta distribuição da água resulta do facto de, tanto no cenário 2 como no cenário 3, o valor do erro médio para os nós 870, 180 e 650 terem diminuído consideravelmente com o aumento da quantidade de água neles introduzidos.

Na Figura 32 apresenta-se o relatório de calibração obtido no cenário 4.

Tabela 11 - Distribuição do volume de água não facturada no cenário 4

Dividir 50% das perdas percentualmente por estes nós		
Nós	%	Consumos (l/s)
870	0,45	0,897
180	0,35	0,698
650	0,10	0,199
160	0,05	0,100
10	0,05	0,100
230	0,00	0,000
Dividir 50% das perdas percentualmente por 93 nós		
Restantes nós		0,021

Localização	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N220	1	79.50	79.64	0.136	0.136
N120	1	72.50	73.08	0.583	0.583
N180	1	60.00	62.87	2.874	2.874
N870	1	61.50	64.75	3.247	3.247
N160	1	67.10	68.97	1.871	1.871
N880	2	54.05	53.75	0.642	0.707
N1000	1	74.00	75.35	1.345	1.345
N320	1	70.00	72.52	2.522	2.522
N230	1	86.00	80.09	5.910	5.910
N20	1	83.00	82.72	0.282	0.282
N10	1	88.80	83.94	4.858	4.858
N650	1	49.50	52.57	3.073	3.073
N570	1	63.72	62.34	1.379	1.379
N540	1	64.50	66.47	1.969	1.969
N420	1	71.00	70.41	0.585	0.585
N550	1	70.60	70.35	0.247	0.247
N760	1	21.00	23.55	2.550	2.550
N480	1	52.00	54.67	2.668	2.668
N660	1	42.50	43.51	1.010	1.010
N490	1	49.00	51.51	2.508	2.508
N830	1	22.00	24.70	2.700	2.700
Rede	22	61.65	62.34	1.982	2.471

Correlação entre Valores Médios: 0.993

Figura 32 - Relatório de calibração para o cenário 4 - EPANET 2.0

A análise da Figura 32 permite constatar que o erro médio, no total dos 21 nós, se situa abaixo dos 2,0m, o que demonstra que as pressões simuladas estão muito próximas das observadas. No entanto, não é correcto afirmar que o modelo se encontra calibrado, dada a existência de pontos da rede (nós assinalados no rectângulo a amarelo) onde se verificam pressões superiores às definidas nos critérios relativos à calibração de pressões, expostas no capítulo 2.

❖ Cenário 5

Para este cenário, 70% do volume de água não facturada será distribuída pelos nós 160, 180, 650 e 870 e 30% pelos demais 93 nós da rede (Ver tabela 13). O consumo-base dos nós 10 e 230 foi definido considerando somente a parcela de água correspondente ao consumo facturado na rede.

Tabela 12 - Distribuição do volume de água não facturada no cenário 5

Dividir 70% das perdas percentualmente por estes nós		
Nós	%	Consumos (l/s)
10	0,00	0,000
160	0,25	0,698
180	0,25	0,698
230	0,00	0,000
650	0,20	0,558
870	0,30	0,837
Dividir 30% das perdas percentualmente por 93 nós		
Restantes nós		0,013

Na Figura 33 apresenta-se a localização na rede dos nós 160, 180, 650 e 870.

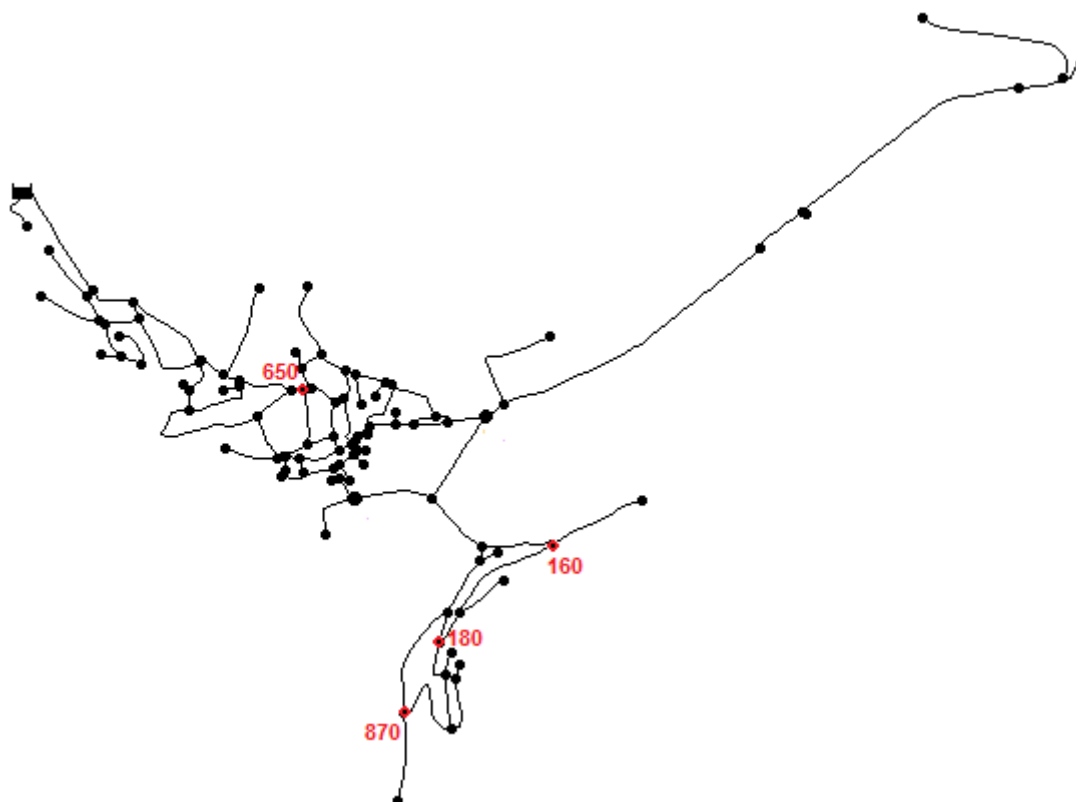


Figura 33 - Locais de distribuição do volume de água não facturado no cenário 5 - EPANET 2.0

Relatório de Calibração - Pressão

Estadísticas | Gráfico de Correlação | Comparação de Valores Médios

Localização	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N220	1	79.50	79.00	0.500	0.500
N120	1	72.50	72.44	0.064	0.064
N180	1	60.00	62.17	2.167	2.167
N870	1	61.50	64.06	2.563	2.563
N160	1	67.10	68.19	1.088	1.088
N880	2	54.05	53.07	0.979	1.170
N1000	1	74.00	75.11	1.106	1.106
N320	1	70.00	72.30	2.296	2.296
N230	1	86.00	79.79	6.215	6.215
N20	1	83.00	82.31	0.691	0.691
N10	1	88.80	83.65	5.151	5.151
N650	1	49.50	52.38	2.876	2.876
N570	1	63.72	62.16	1.564	1.564
N540	1	64.50	66.28	1.784	1.784
N420	1	71.00	70.23	0.769	0.769
N550	1	70.60	70.17	0.433	0.433
N760	1	21.00	23.52	2.516	2.516
N480	1	52.00	54.49	2.491	2.491
N660	1	42.50	43.42	0.915	0.915
N490	1	49.00	51.41	2.414	2.414
N830	1	22.00	24.68	2.682	2.682
Rede	22	61.65	61.99	1.920	2.418

Correlação entre Valores Médios: 0.994

Figura 34 - Relatório de calibração para o cenário 5 - EPANET 2.0

Analisando o relatório de calibração dos 5 cenários estudados foi evidente que, em nenhum momento do processo de calibração do modelo computacional, os nós 10 e 230 tiveram em concordância com os restantes 19 pontos utilizados. Este facto torna-se evidente ao observar o gráfico de correlação de pressão representado na figura 35.

Na tabela 14 apresentam-se os valores das pressões obtidos nos 5 cenários. Em cada cenário considerado podemos observar os resultados da pressão observado e simulado, e analisar ainda o decréscimo do erro médio desde o cenário 1 até ao cenário 5.

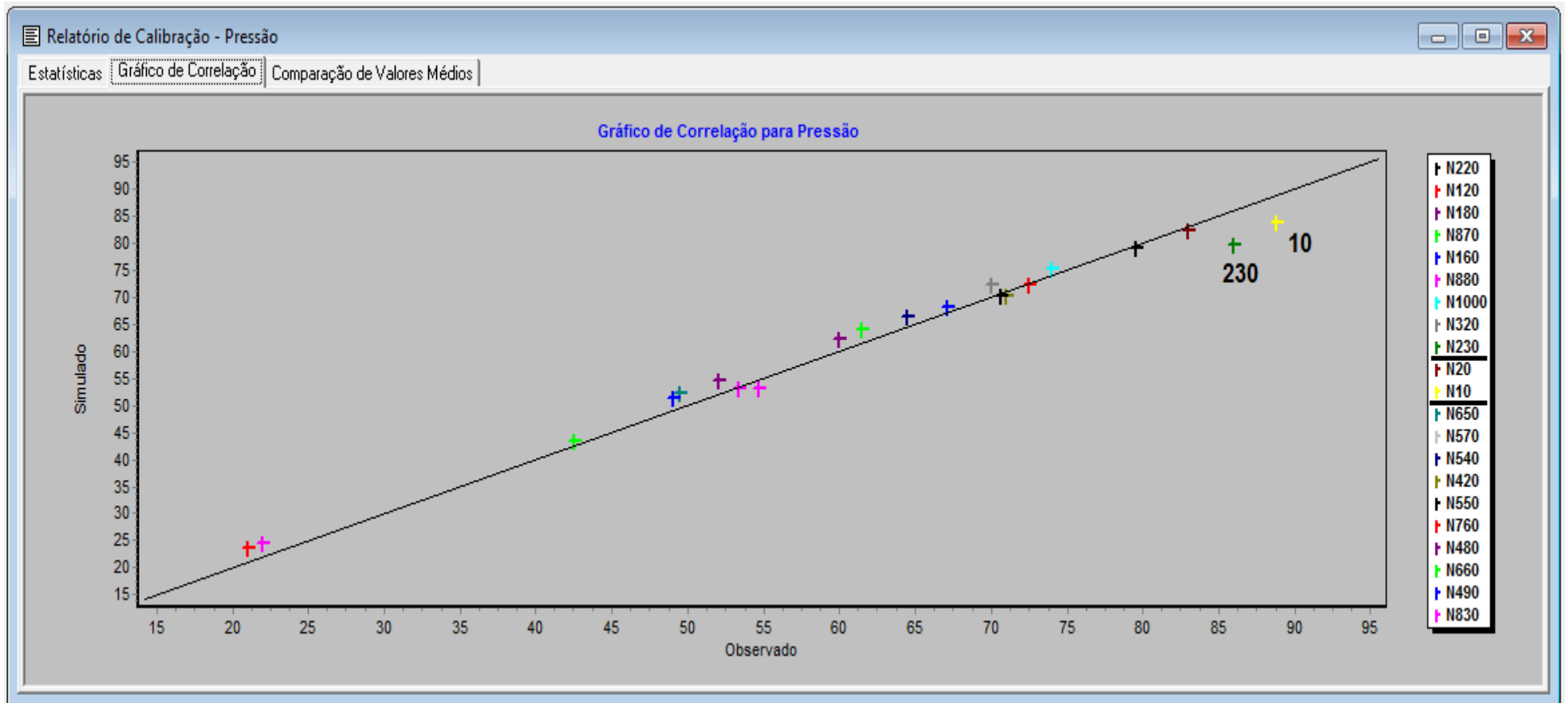


Figura 35 - Gráfico de correlação para pressão - EPANET 2.0

Tabela 13 - Síntese dos resultados obtidos nos 5 relatórios de calibração apresentados.

Localização	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4			Cenário 5		
	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd
N220	79.50	86.40	6.902	79.50	81.20	1.703	79.50	79.93	0.433	79.50	79.64	0.136	79.50	79.00	0.500
N120	72.50	79.90	7.401	72.50	74.70	2.196	72.50	73.41	0.911	72.50	73.08	0.583	72.50	72.44	0.064
N180	60.00	69.90	9.901	60.00	64.67	4.674	60.00	63.33	3.328	60.00	62.87	2.874	60.00	62.17	2.167
N870	61.50	71.90	10.401	61.50	66.67	5.171	61.50	65.31	3.807	61.50	64.75	3.247	61.50	64.06	2.563
N160	67.10	75.90	8.801	67.10	70.68	3.580	67.10	69.34	2.236	67.10	68.97	1.871	67.10	68.19	1.088
N880	54.05	60.90	6.851	54.05	55.67	1.625	54.05	54.31	0.644	54.05	53.75	0.642	54.05	53.07	0.979
N1000	74.00	80.92	6.921	74.00	76.02	2.016	74.00	75.21	1.209	74.00	75.35	1.345	74.00	75.11	1.106
N320	70.00	77.93	7.926	70.00	73.10	3.103	70.00	72.37	2.370	70.00	72.52	2.522	70.00	72.30	2.296
N230	86.00	85.90	0.096	86.00	80.89	5.112	86.00	79.88	6.123	86.00	80.09	5.910	86.00	79.79	6.215
N20	83.00	88.90	5.904	83.00	83.82	0.822	83.00	82.72	0.276	83.00	82.72	0.282	83.00	82.31	0.691
N10	88.80	89.91	1.110	88.80	84.86	3.942	88.80	83.85	4.954	88.80	83.94	4.858	88.80	83.65	5.151
N650	49.50	56.96	7.464	49.50	52.80	3.298	49.50	52.38	2.884	49.50	52.57	3.073	49.50	52.38	2.876
N570	63.72	66.95	3.235	63.72	62.61	1.113	63.72	62.16	1.563	63.72	62.34	1.379	63.72	62.16	1.564
N540	64.50	70.96	6.460	64.50	66.71	2.207	64.50	66.28	1.784	64.50	66.47	1.969	64.50	66.28	1.784
N420	71.00	74.96	3.958	71.00	70.67	0.335	71.00	70.23	0.770	71.00	70.41	0.585	71.00	70.23	0.769
N550	70.60	74.96	4.355	70.60	70.62	0.022	70.60	70.17	0.431	70.60	70.35	0.247	70.60	70.17	0.433
N760	21.00	26.08	5.078	21.00	23.53	2.530	21.00	23.46	2.458	21.00	23.55	2.550	21.00	23.52	2.516
N480	52.00	58.97	6.970	52.00	54.87	2.869	52.00	54.50	2.496	52.00	54.67	2.668	52.00	54.49	2.491
N660	42.50	47.01	4.507	42.50	43.58	1.076	42.50	43.38	0.876	42.50	43.51	1.010	42.50	43.42	0.915
N490	49.00	55.01	6.007	49.00	51.57	2.574	49.00	51.37	2.374	49.00	51.51	2.508	49.00	51.41	2.414
N830	22.00	27.09	5.089	22.00	24.65	2.652	22.00	24.61	2.614	22.00	24.70	2.700	22.00	24.68	2.682
Rede	61.65	67.65	6.008	61.65	63.16	2.466	61.65	62.39	2.054	61.65	62.34	1.982	61.65	61.99	1.920

Uma vez que nos diferentes cenários o erro médio verificado nos nós 10 e 230 se apresentou muito elevado, e de forma a eliminar qualquer dúvida associada à primeira campanha realizada no terreno, procedeu-se a um novo levantamento de medições de pressão nesses dois nós. Dessa análise foi possível concluir-se que houve um erro na leitura da pressão nesses pontos, como pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14 - Relatório de calibração para os nós 10 e 230.

Localização	Nova Média Observada	Média Simulada	Erro Médio
10	82	83,65	1,65
230	80	79,79	1,79

Nos resultados apresentados no cenário 5 (Tabela 13) pode verificar-se que o erro médio nos nós 10 e 230 é de 5,15 e de 6,22, respectivamente. Enquanto, na Tabela 14 o erro é de 1,65 para o nó 10 e 1,79 para o nó 230.

Na Figura 36 apresenta-se uma representação gráfica comparativa dos valores médios da pressão nos pontos que serviram de suporte para a calibração do modelo computacional, e na Figura 37 apresenta-se o relatório de calibração do cenário 5 com as respectivas pressões corrigidas.

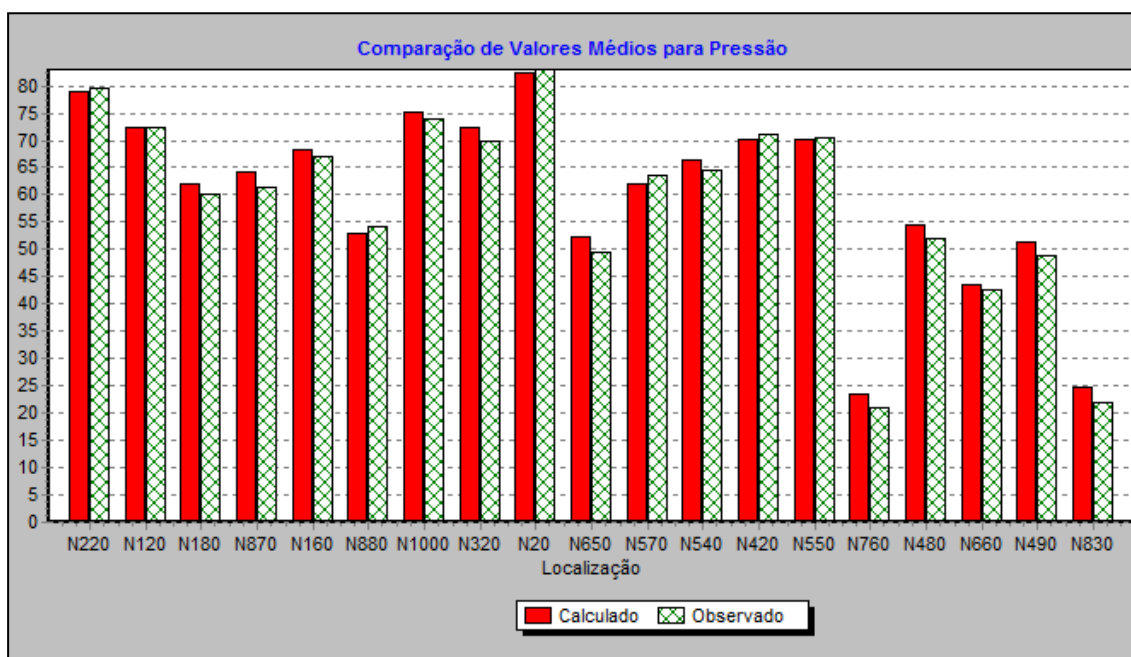


Figura 36 - Comparação de valores Médios para Pressão - EPANET 2.0

Localização	Num Obs	Méd Obs	Méd Sim	Erro Méd	Desv Pad
N220	1	79.50	79.00	0.500	
N120	1	72.50	72.44	0.064	
N180	1	60.00	62.17	2.167	
N870	1	61.50	64.06	2.563	
N160	1	67.10	68.19	1.088	
N880	2	54.05	53.07	0.979	
N1000	1	74.00	75.11	1.106	
N320	1	70.00	72.30	2.296	
N230	1	80.00	79.79	1.790	
N20	1	83.00	82.31	0.691	
N10	1	82.00	83.65	1.650	
N650	1	49.50	52.38	2.876	
N570	1	63.72	62.16	1.564	
N540	1	64.50	66.28	1.784	
N420	1	71.00	70.23	0.769	
N550	1	70.60	70.17	0.433	
N760	1	21.00	23.52	2.516	
N480	1	52.00	54.49	2.491	
N660	1	42.50	43.42	0.915	
N490	1	49.00	51.41	2.414	
N830	1	22.00	24.68	2.682	
Rede	22	59.08	60.02	1.544	1.782

Correlação entre Valores Médios: 0.997

Figura 37 - Relatório de calibração para o cenário 5 - EPANET 2.0

❖ Verificação Final do Modelo

Water Research Center (Reino Unido)

A maior perda de carga constatada na rede é de 29,82 m/km e verifica-se no troço 820 como se pode verificar na figura 37.

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Caudal LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
Tubagem T820	9.79	57	130	2.90	1.14	29.82	Open

Figura 38 - Dados relativos ao troço 820 - EPANET 2.0

Do exposto na subsecção 2.4.4, para um modelo poder ser considerado calibrado 100% dos valores medidos na rede deverão satisfazer a maior das duas tolerâncias:

- ❖ ± 2 m;
- ❖ $\pm 15\%$ da maior perda de carga verificada na rede = $0,15 \times 29,82 = \pm 4,473$ m.

No cenário 5 do presente estudo, o maior erro médio verificado é de 2,876m (Nó 650), inferior a maior tolerância anteriormente calculada (4,473m). Verificando assim o critério definido pelo WRC e deste modo pode considerar-se que o modelo está calibrado.

American Water Works Association (USA)

No sistema de verificação do modelo sugerido pela *American Water Works Association (AWWA)*, o processo de calibração é mais exigente do que o sugerido pela WRC, como pode ser observado na Tabela 3, subcapítulo 2.4.4. Segundo a AWWA, para um modelo destinado à exploração de um Sistema de Distribuição, em 90% dos nós utilizados à pressão medida no terreno, tem que respeitar uma tolerância de $\pm 2,1$, em relação à pressão obtida na simulação.

Enquanto a AWWA sugere que para a calibração proceda-se ao levantamento da pressão entre 2 - 10% do total dos nós existentes na rede, no presente caso de estudo realizou-se o levantamento em 21% dos nós.

Dos 21 nós analisados, aproximadamente 70% destes respeitam a relação da pressão anteriormente exposta. Pode-se considerar que o modelo apresentado no cenário 5 encontra-se calibrado, pelo facto de no presente caso de estudo ter sido utilizado um grande número de nós para o processo de calibração. Note-se ainda que a AWWA exige um nível de detalhe variável entre o baixo e elevado para os modelos destinados a exploração.

4.3 Ensaios de Fuga

Após a conclusão do processo de calibração foram realizados 3 ensaios de fuga, de modo a aferir o comportamento do modelo hidráulico, permitindo demonstrar a validade do mesmo para a realização de operações futuras na rede. Os ensaios foram realizados com o auxílio dos técnicos da ADC, para um cenário de perda de água localizada em um ponto do SDA.

A realização dos ensaios consiste em impor uma fuga de água, através da abertura de uma boca-de-incêndio, em um ponto conhecido da rede durante um determinado período de tempo. Deste modo, o caudal que se perde nesse instante é conhecido. Após a estabilização das pressões, foi medido o caudal e este valor foi posteriormente introduzido no modelo computacional calibrado, no nó correspondente ao ponto da rede onde foi imposta a fuga.

Após se considerar que as pressões estavam estabilizadas foram escolhidos aleatoriamente dois a três nós da rede onde se procedeu a medição da mesma. Posteriormente, fez-se o estudo para cada um dos três ensaios, onde em cada uma delas é possível ver nas tabelas a

relação entre os valores medidos no terreno e os obtidos no modelo. Esta comparação de valores de pressão foi realizada tanto antes como durante da fuga de água imposta.

❖ **Ensaio 1**

No primeiro ensaio, a fuga foi simulada na boca-de-incêndio correspondente ao nó 660 do modelo e o caudal simulado foi de 4,76 l/s.

Na figura 39 assinala-se a amarelo a localização do nó referente a ponto da rede, onde se procedeu à abertura da boca-de-incêndio (Nó 660). Nela também está assinalado a vermelho o posicionamento dos nós 490 e 650, onde foram efectuadas as medições da pressão nesse ensaio.

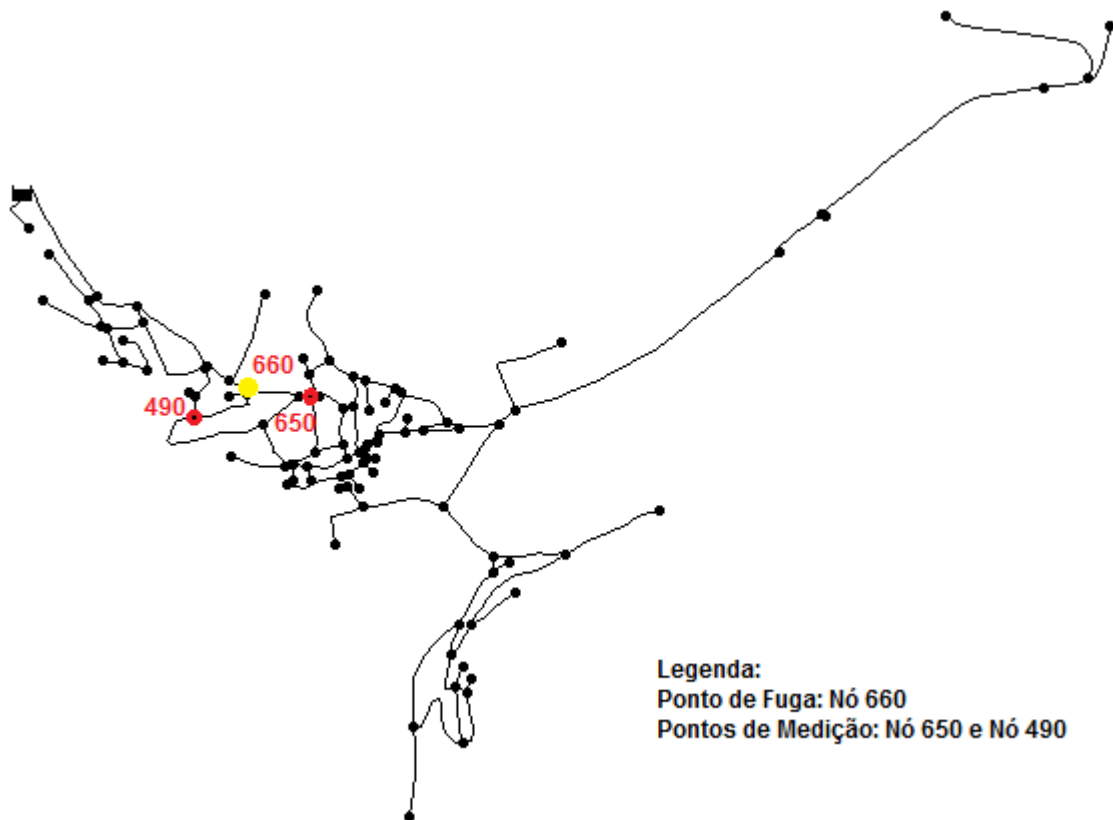


Figura 39 - Localização dos pontos de fuga de água e de medição das pressões no 1º ensaio - EPANET 2.0

Na tabela 15 apresentam-se os resultados da comparação entre os valores de pressões simulados e as medidas no terreno, quer antes quer durante a fuga.

Tabela 15 - Pressões antes e durante a fuga (Teste 1)

Boca-de-incêndio no nó 660						
Nó	Antes da fuga		ERRO (m)	Durante a fuga		ERRO (m)
	pmedida (m)	Psimulada (m)		pmedida (m)	psimulada (m)	
660	43	43,08	-0,08			
650	52	52,01	-0,01	42	41,81	0,19
490	48	50,31	-2,31	40,5	40,29	0,21

Ao analisar os baixos valores de erro obtidos entre as pressões medidos no terreno e os nos simulados Epanet 2.0 é possível verificar que o modelo calibrado representa de forma muito similar o comportamento da rede.

❖ Ensaio 2

Para o segundo ensaio o ponto escolhido para abertura da boca-de-incêndio corresponde ao nó 420 do modelo e o caudal calculado foi de 4 l/s.

Na figura 40 assinala-se a amarelo a localização do nó referente a ponto da rede, onde se procedeu à abertura da boca-de-incêndio (Nó 420). Nela também está assinalado a vermelho o posicionamento dos nós 350, 540 e 570, onde foram efectuadas as medições da pressão nesse ensaio.

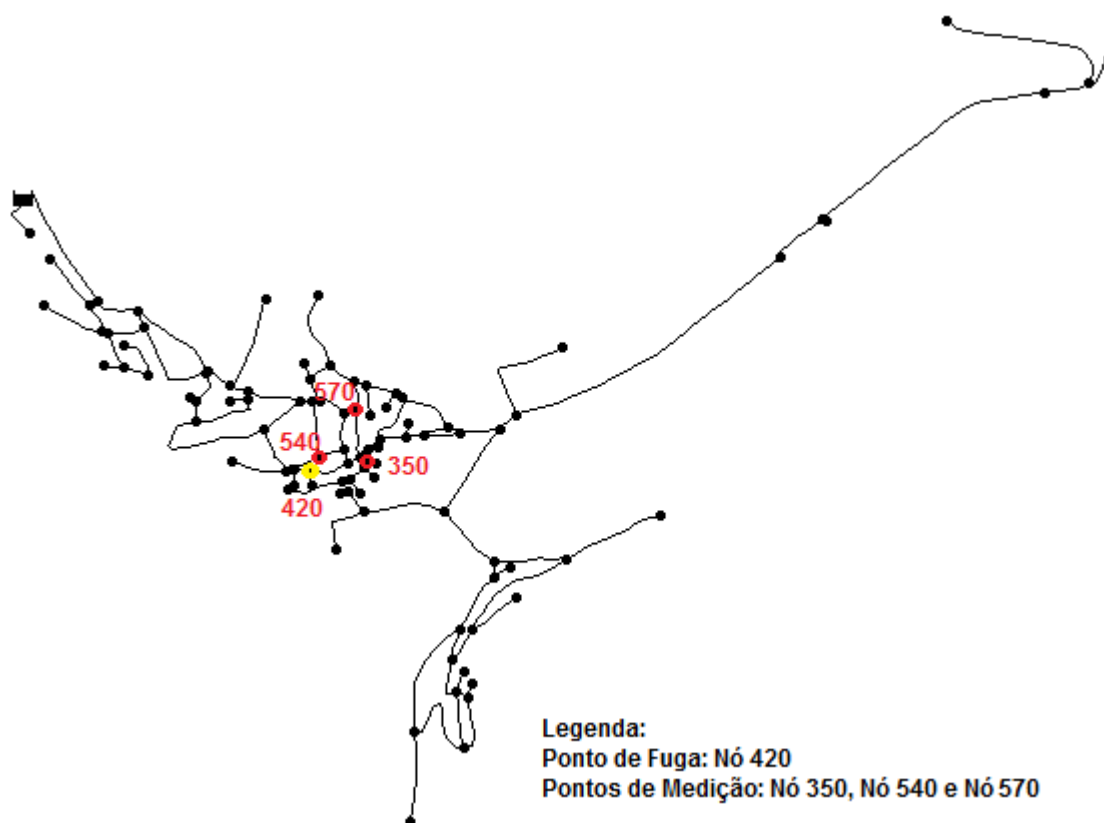


Figura 40 - Localização dos pontos de fuga de água e de medição das pressões no 2º ensaio - EPANET 2.0

Na tabela 16 apresenta-se os resultados da comparação entre os valores de pressões simulados e as medidas no terreno, quer antes quer durante a fuga.

Tabela 16 - Pressões antes e durante a fuga (Teste 2)

Boca-de-incêndio no nó 420						
Nó	Antes da fuga		ERRO (m)	Durante a fuga		ERRO (m)
	pmedida (m)	Psimulada (m)		pmedida (m)	psimulada (m)	
420	69	69,15	-0,15			
350	76	75,46	0,54	65	65,02	-0,02
570	65	62,16	2,84	55	52,21	2,79
540	63	64,73	-1,73	52,5	52,96	-0,46

Os valores de erro obtidos no segundo ensaio vêm reforçar a conclusão tirada após análise dos valores de erro atingidos no primeiro ensaio.

❖ Ensaio 3

Para o terceiro ensaio o ponto escolhido para abertura da boca-de-incêndio corresponde ao nó 170 do modelo e o caudal calculado foi de 3,76 l/s.

Na figura 41 assinala-se a amarelo a localização do nó referente a ponto da rede, onde se procedeu à abertura da boca-de-incêndio (Nó 170). Nela também está assinalado a vermelho o posicionamento dos nós 420,160 e 870, onde foram efectuadas as medições da pressão nesse ensaio.

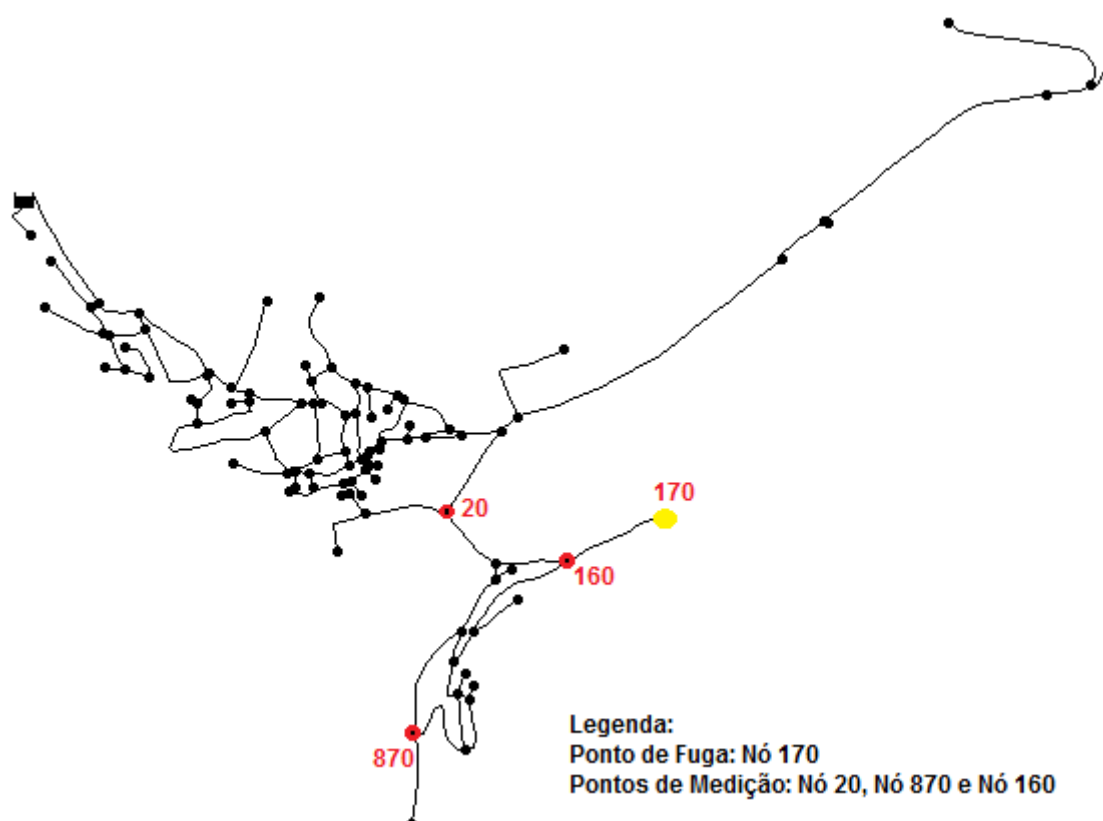


Figura 41 - Localização dos pontos de fuga de água e de medição das pressões no 3º ensaio - EPANET 2.0

Na tabela 17 apresenta-se os resultados da comparação entre os valores de pressões simulados e as medidas no terreno, quer antes quer durante a fuga.

Tabela 17 - Pressões antes e durante a fuga (Teste 3)

Boca-de-incêndio no nó 170						
Nó	Antes da fuga		ERRO (m)	Durante a fuga		ERRO (m)
	pmedida (m)	psimulada (m)		pmedida (m)	psimulada (m)	
170	77	73,77	3,23			
20	82	82,06	-0,06	66	66,1	-0,1
870	67	64,18	2,82	48	44,61	3,39
160	66	65,77	0,23	49	47,97	1,03

Depois de analisar e dissipar outras fontes de erro na modelação e calibração do modelo, nomeadamente, associados aos coeficientes de rugosidade das condutas, aos registos de cadastro e a simplificações na rede e após a análise dos resultados obtidos nos três ensaios de fuga é exequível concluir a validade do modelo computacional. Em suma, o modelo associado ao cenário 5, do processo de calibração apresentado anteriormente, se apresenta como instrumento de apoio à realização de projectos futuros na rede de distribuição da freguesia de Verdelhos.

O modelo calibrado assegura a velocidade de escoamento máxima para todos os troços da rede de distribuição. De acordo com o Decreto-lei nº23/95, o valor da velocidade máxima a recomendado nas condutas varia com o diâmetro das mesmas, através da seguinte fórmula:

$$v = 0,127D^{0,4} \quad (10)$$

- ❖ V - velocidade (m/s)
- ❖ D - diâmetro das tubagens (mm)

O SDA de Verdelhos é constituído por tubagens em PVC com os seguintes diâmetros, 63 mm, 75 mm e 90 mm, deste modo as velocidades máximas recomendadas são, 0,66 m/s, 0,71 m/s e 0,77 m/s, respectivamente. Da análise aos valores da velocidade apresentados no Anexo I verifica-se que as velocidades de escoamento têm valores aceitáveis.

4.4 Introdução de Válvulas Redutoras de Pressão no Modelo

Finalizados os três primeiros objectivos previstos para este caso de estudo, e atingidos os propósitos previamente definidos, pretende-se resolver as questões técnicas ligadas ao controlo de pressão e de redução das perdas de água. Nesta secção, expõe-se o modo como a partir do modelo, se encontrou a solução relativa ao troço da rede de distribuição de água da freguesia de Verdelhos onde se irá introduzir a válvula redutora de pressão.

O Decreto Regulamentar n.º 23/95 prevê que a pressão num ponto de consumo (nó) deve estar compreendida entre um valor mínimo e um valor máximo (Ver Subcapítulo 3.1.1). Assegurar o correcto desempenho de qualquer Sistema de Distribuição de Água passa por garantir que não existem pontos de consumo com valores de pressão inferiores ao valor mínimo regulamentar e acautelar que o valor limite máximo de pressão não seja ultrapassado.

A preocupação em garantir que, em determinado ponto de consumo da rede de distribuição, a pressão não desce abaixo de um determinado patamar, está relacionada com o facto de a pressão ser fundamental para que se possa assegurar aos consumidores, o caudal por eles pretendido.

Por outro lado, limitar o valor máximo das pressões está directamente relacionado com o correcto funcionamento dos materiais instalados na rede. Os sistemas de distribuição que funcionam com pressões superiores a aquelas necessárias para garantir o abastecimento as populações, estão mais passivos de apresentar valores excessivos de perdas de água e apresentam um maior risco de rotura dos seus componentes.

A introdução de uma VRP no SDA de Verdelhos tem com objectivo principal reduzir a pressão na rede, a valores máximos regulamentares sem prejudicar o consumidor, e seleccionar a melhor solução relativa ao local para a sua implantação, de modo a utilizar o numero mínimo válvulas. Na figura 42 apresenta-se o gráfico de isolinhas de Valores médios das pressões no SDA de Verdelhos que representa o nível actual de pressões na rede de distribuição.

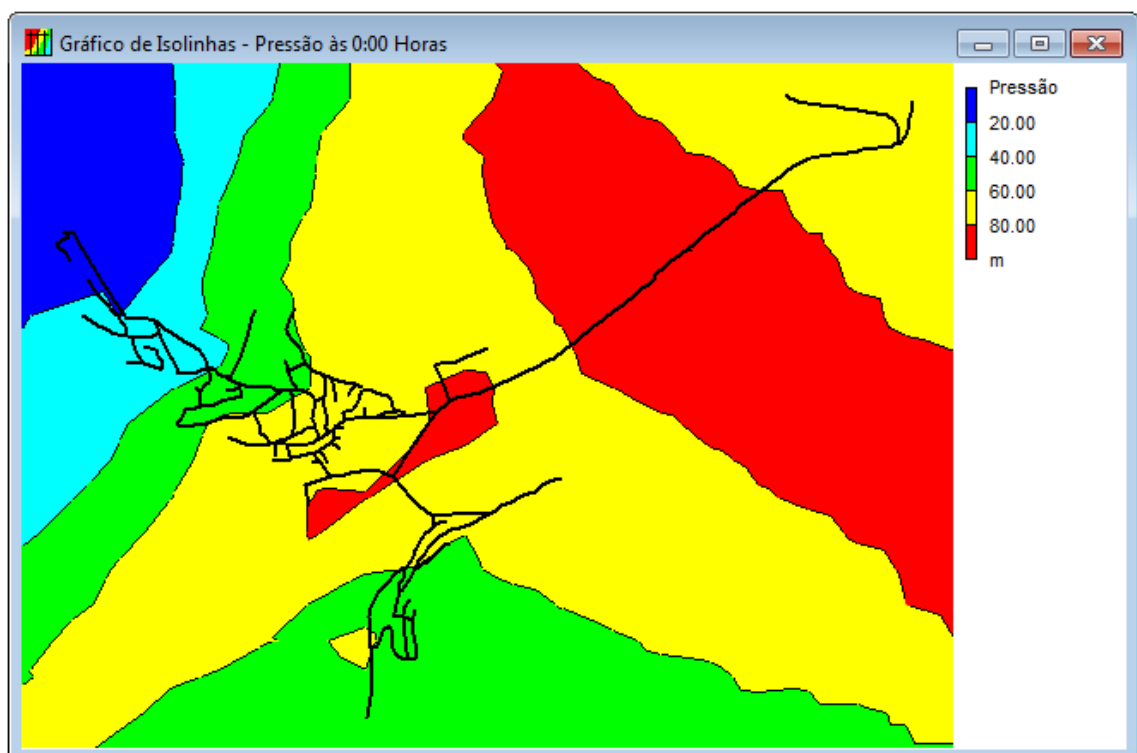


Figura 42 - isolinhas de Valores Médios das Pressões no SDA de Verdelhos - EPANET 2.0

Os resultados obtidos com a simulação, e tal como pode ser observado na Figura 42, na zona de menor cota, zona onde se aglomera a maior percentagem dos pontos de consumo, a pressão atinge valores elevados na ordem dos 90 m, muito acima do valor máximo previsto no Decreto Regulamentar n.º 23/95. Verifica-se também que, cerca de 65% dos pontos de consumo da rede apresentam valores acima dos 60m (Valor máximo regulamentar).

A válvula redutora de pressão ou válvula de controlo da pressão a jusante limita a pressão de saída na válvula num determinado ponto da rede. A válvula é caracterizada por um parâmetro de controlo da pressão, que descreve o ponto de operação desta.

Na modelação, as principais considerações relativos à introdução de uma VRP no modelo vão no sentido de assegurar que, ela não seja ligada directamente a um reservatório, de modo a garantir um correcto desempenho, é necessário uma considerável extensão de tubagem a separar os dois componentes. Não é introduzida a montante de uma Válvula de Alívio (VA) e que duas VRP`s não são ligadas em serie nem partilhar a mesma tubagem. Note-se que durante o estudo, todas estas restrições foram asseguradas.

Seguidamente apresentam-se as soluções estudadas para a implantação da VRP. Os comentários relativos as soluções apresentadas serão expostas após a apresentação das cinco soluções.

4.4.1 Solução 1

Salienta-se que em todas as soluções, a VRP foi introduzida na área da rede de distribuição onde a pressão actual não atinge o valor máximo regulamentar (Figura 43). Este facto, advém do objectivo de assegurar que, em nenhum ponto de consumo a montante da válvula, a pressão seja superior a 60 m.

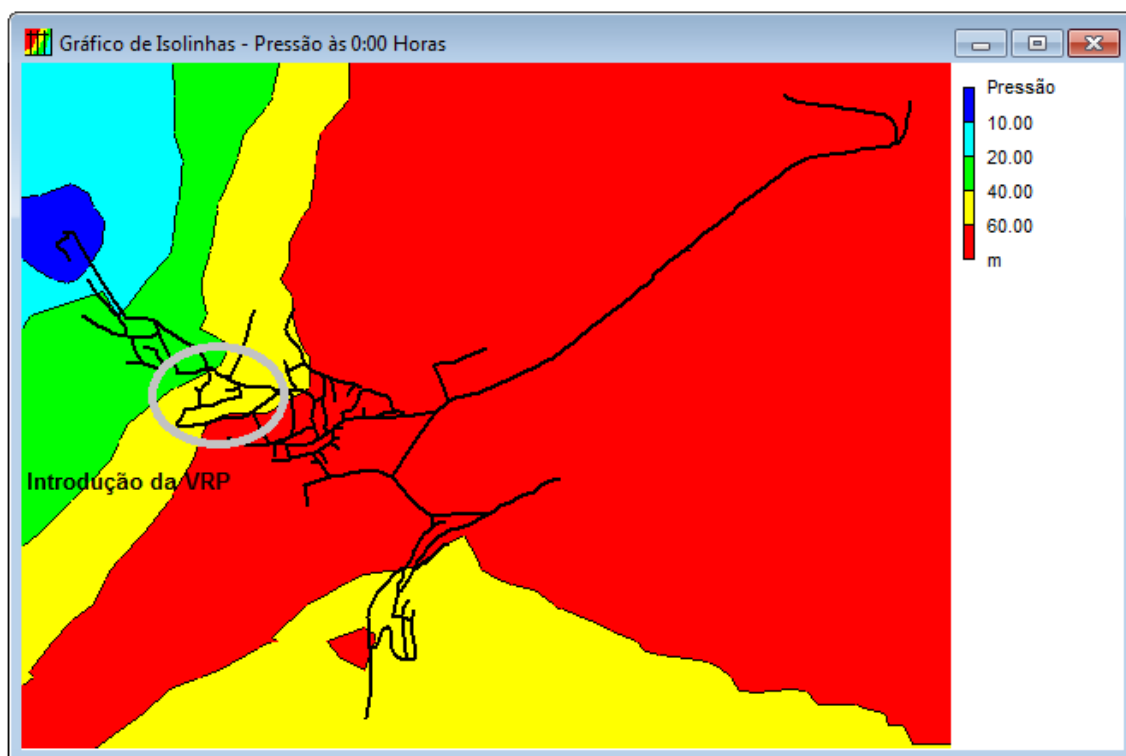


Figura 43 - Zona de introdução da Válvula Redutora de Pressão - EPANET 2.0

Neste cenário, a válvula foi introduzida no ponto médio do troço 740, situada entre os nós 740 (inicial) e 690 (final), onde a pressão varia entre os 35,57 m e 40,35 m, respectivamente.

Na Figura 44 apresentam-se as informações relativas aos dados da VRP, introduzidos no simulador Epanet 2.0, para a primeira solução. Os dados precedidos por um “ * ” foram os definidos pelo autor, sendo os restantes calculados pelo simulador.

Propriedade	Valor
Zona	
*Diâmetro	200
*Tipo	PRV
*Parâmetro de Controlo	20
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None
Caudal	4.08
Velocidade	0.13
Perda de Carga	20.57
Qualidade	0.00
Estado	Active

Figura 44 - Características da VRP utilizada na Solução 1 - EPANET 2.0

Na Figura 45 apresenta-se a localização da VRP, podendo-se observar que o troço 550 se encontra fechado, como mostram as setas indicativas da direcção do escoamento. O fecho do troço 550 resulta da necessidade, de impor que todo o volume de água destinado a abastecer os pontos de consumo a jusante da válvula passe pelo troço 740, de modo a ser controlado pelo dispositivo de redução de pressão.

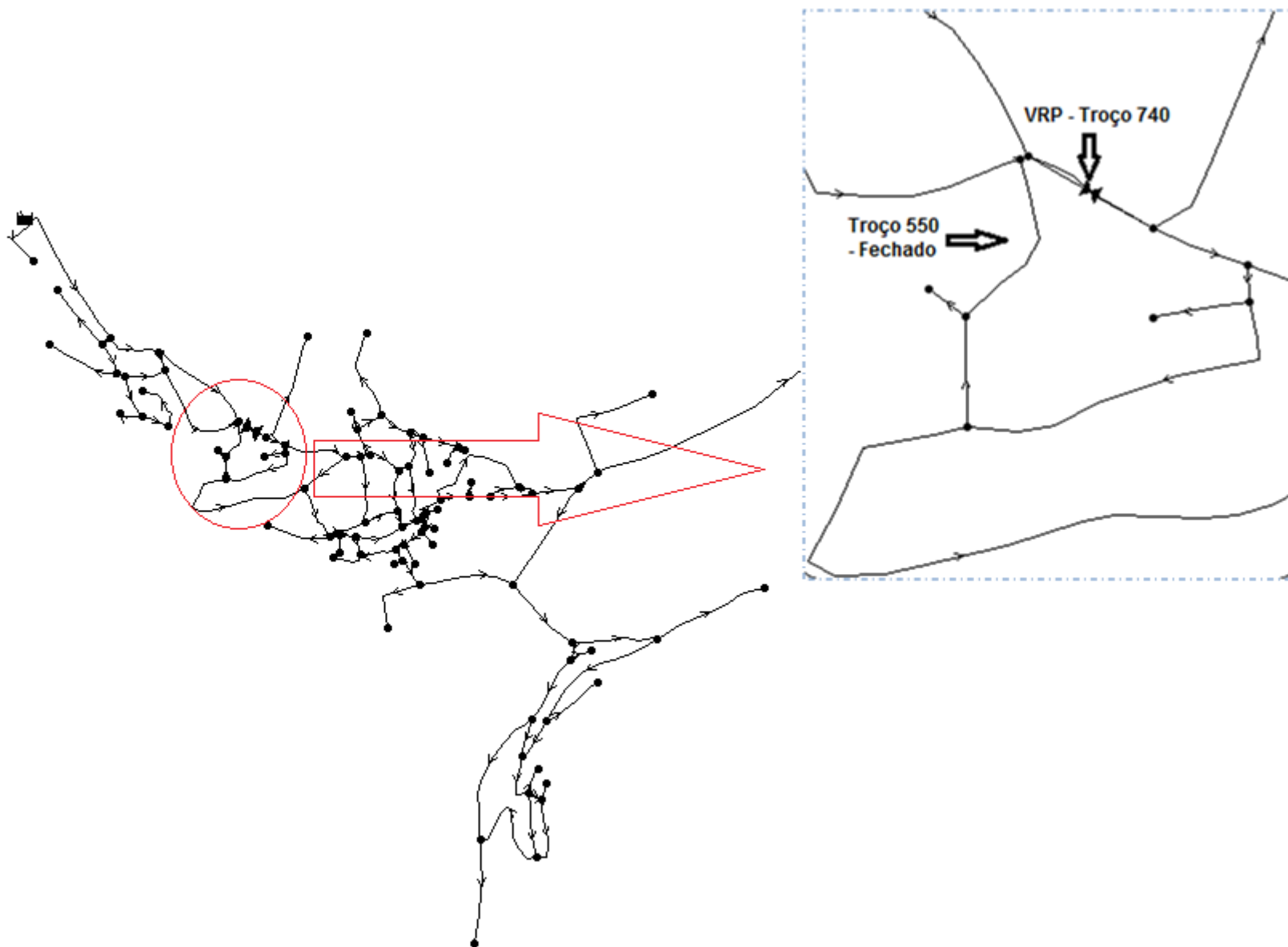


Figura 45 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 1 - EPANET 2.0

Na figura 46 apresenta-se, o gráfico de isolinhas que representa o nível de pressões existente na rede, após a introdução da VRP.

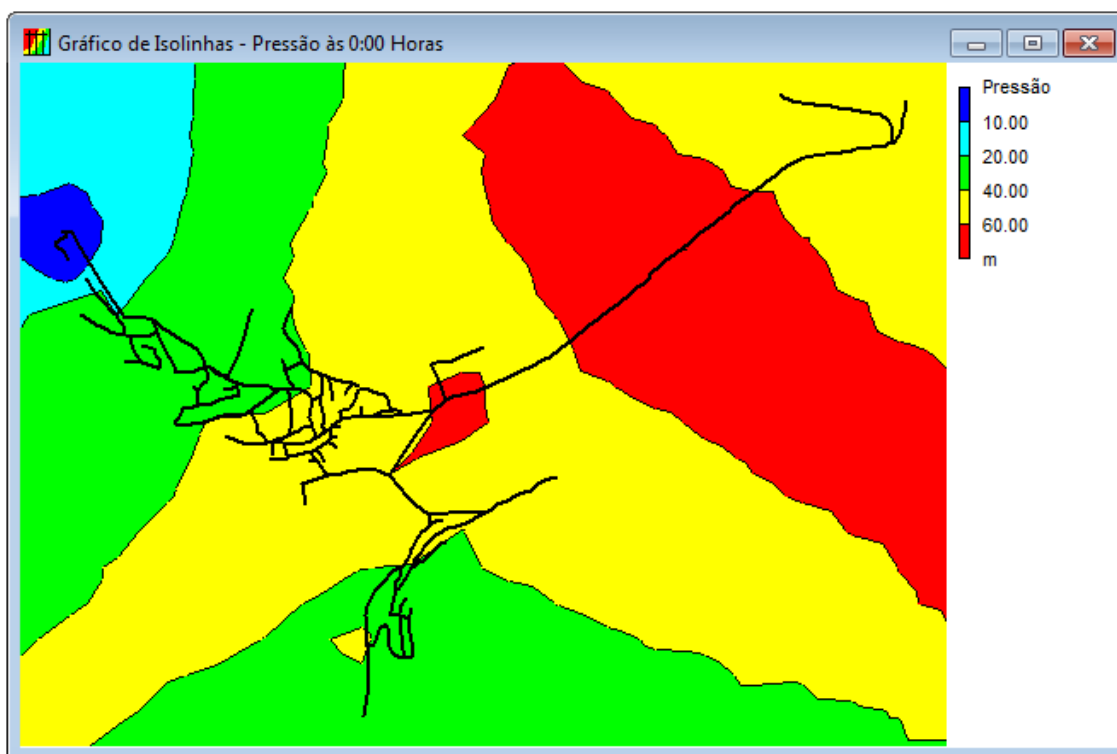


Figura 46 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 1 - EPANET 2.0

4.4.2 Solução 2

Para o segundo caso, a válvula foi introduzida no ponto médio do troço 840, situada entre os nós 520 (inicial) e 650 (final), onde a pressão varia entre os 50,22m e 52,01m, respectivamente.

Na Figura 47 apresenta-se a localização da VRP, podendo observar que o troço 320 se encontra fechado, como mostram as setas indicativas da direcção do escoamento. O fecho do troço 320 resulta da necessidade de, impor que todo o volume de água destinado a abastecer os pontos de consumo a jusante da válvula passe pelo troço 840, de modo a ser controlado pelo dispositivo de redução de pressão.

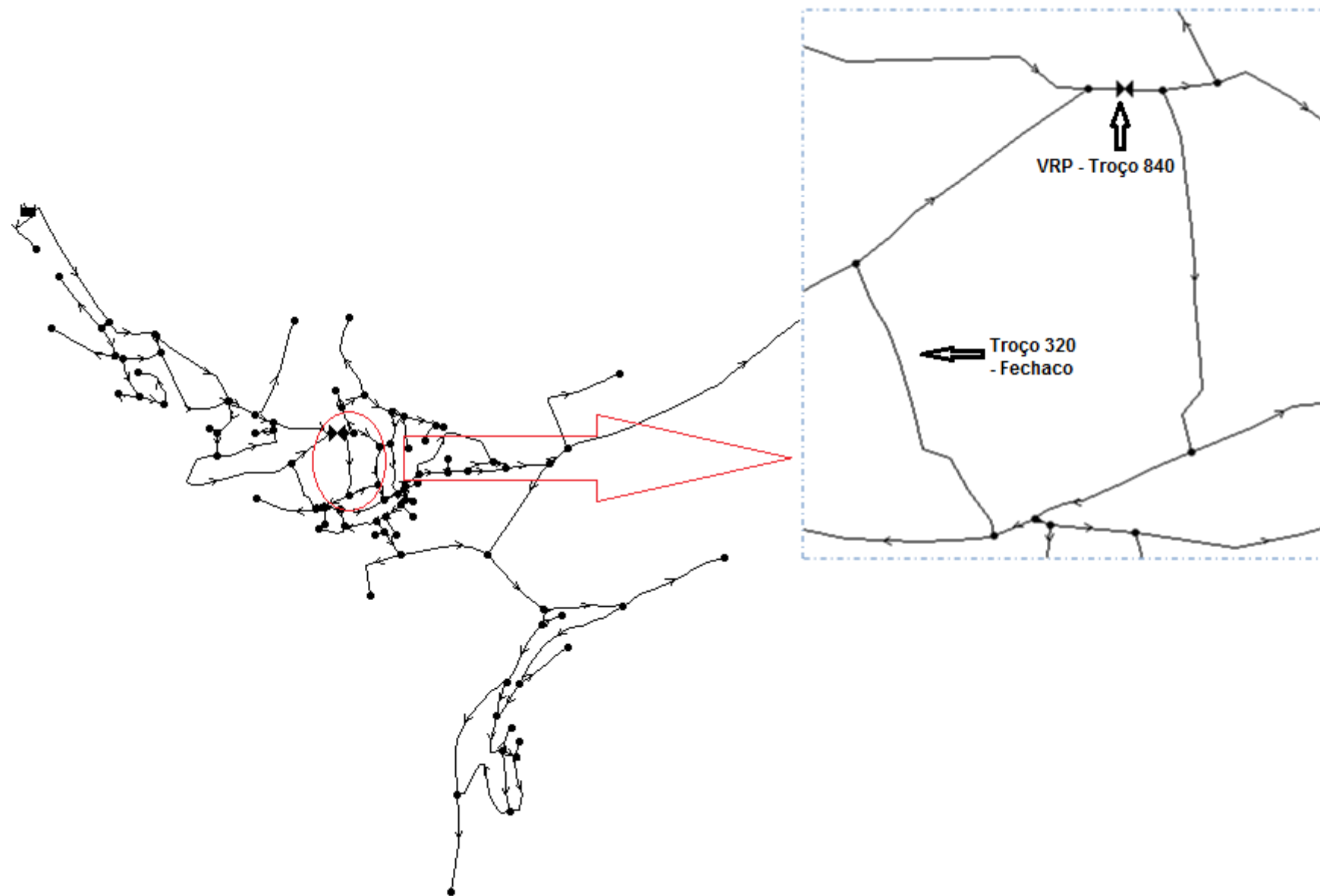


Figura 47 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 2 - EPANET 2.0

Na Figura 48 apresenta-se as informações relativas aos dados da VRP introduzidos no simulador no Epanet 2.0 para a segunda solução. Os dados precedidos por um “ * ” foram os definidos pelo autor, sendo os restantes calculados pelo simulador.

Propriedade	Valor
Zona	
*Diâmetro	200
*Tipo	PRV
*Parâmetro de Controlo	30
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None
Caudal	3.76
Velocidade	0.12
Perda de Carga	22.16
Qualidade	0.00
Estado	Active

Figura 48 - Características da VRP utilizada na Solução 2 - EPANET 2.0

Na figura 49 apresenta-se, o gráfico de isolinhas que representa o nível de pressões existente na rede, após a introdução da VRP.

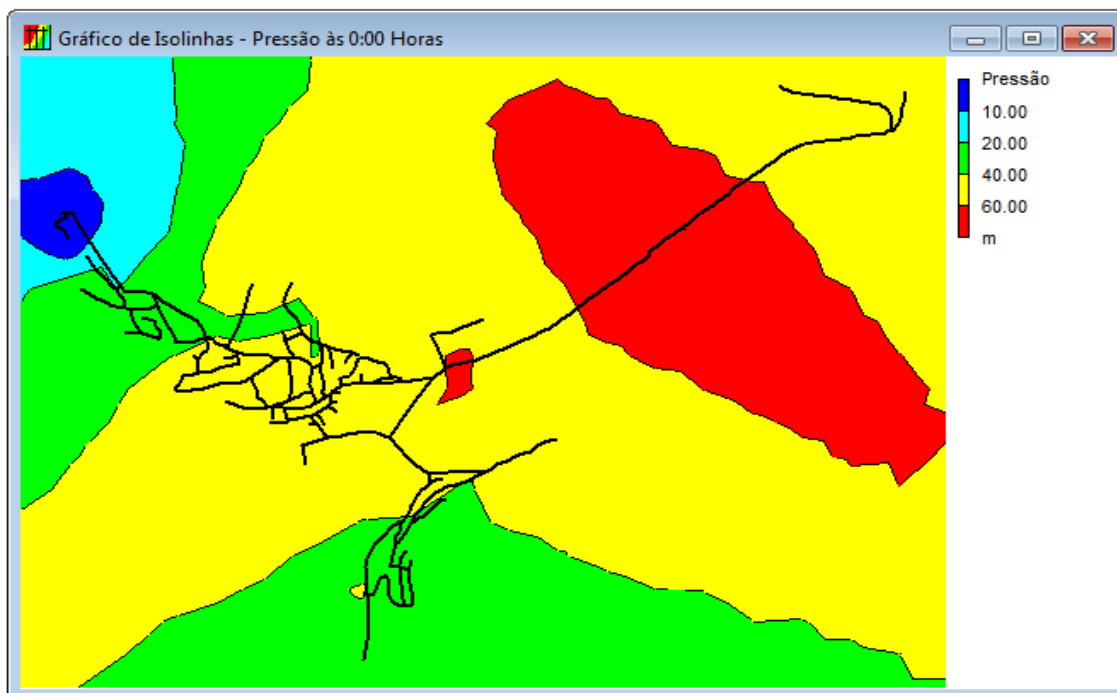
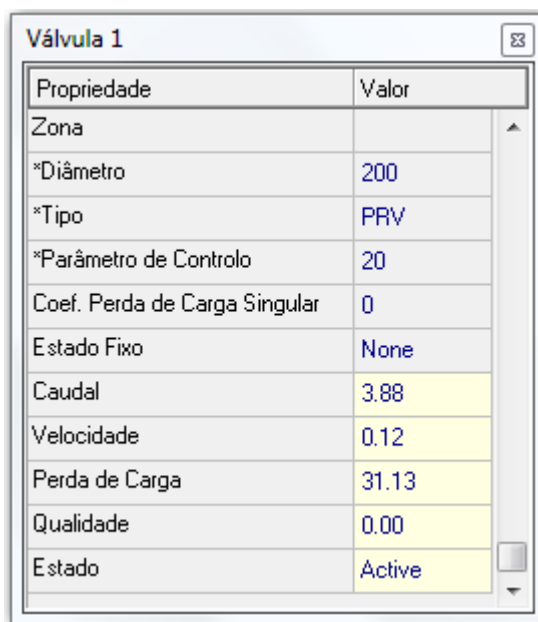


Figura 49 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 2 - EPANET 2.0

4.4.3 Solução 3

No terceiro caso analisado, a válvula foi introduzida no ponto médio do troço 490, situada entre os nós 660 (inicial) e 520 (final), onde a pressão varia entre os 43,20m e 50,22m, respectivamente.

Na Figura 50 apresenta-se as informações relativas aos dados da VRP introduzidos no simulador no Epanet 2.0 para a terceira solução. Os dados precedidos por um “*” foram os definidos pelo autor, sendo os restantes calculados pelo simulador.



Propriedade	Valor
Zona	
*Diâmetro	200
*Tipo	PRV
*Parâmetro de Controlo	20
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None
Caudal	3.88
Velocidade	0.12
Perda de Carga	31.13
Qualidade	0.00
Estado	Active

Figura 50 - Características da VRP utilizada na Solução 3 - EPANET 2.0

Na figura 51 apresenta-se a localização da VRP, podendo observar também que o troço 330 se encontra fechado, como mostram as setas indicativas da direcção do escoamento. O fecho do troço 330 resulta da necessidade de, impor que todo o volume de água destinado a abastecer os pontos de consumo a jusante da válvula passe pelo troço 490, de modo a ser controlado pelo dispositivo de redução de pressão.

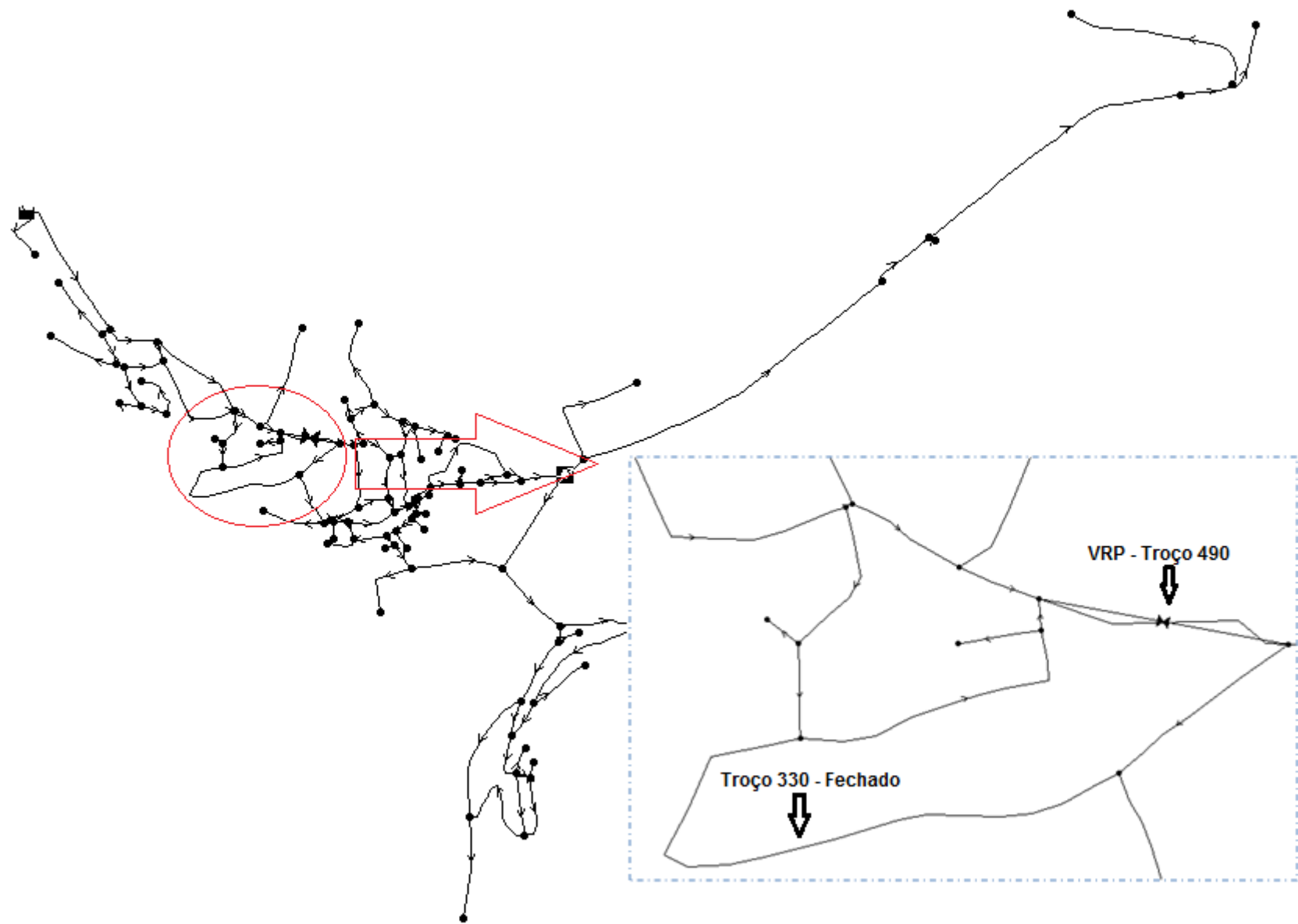


Figura 51 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 3 - EPANET 2.0

Na figura 52 apresenta-se, o gráfico de isolinhas que representa o nível de pressões existente na rede, após a introdução da VRP.

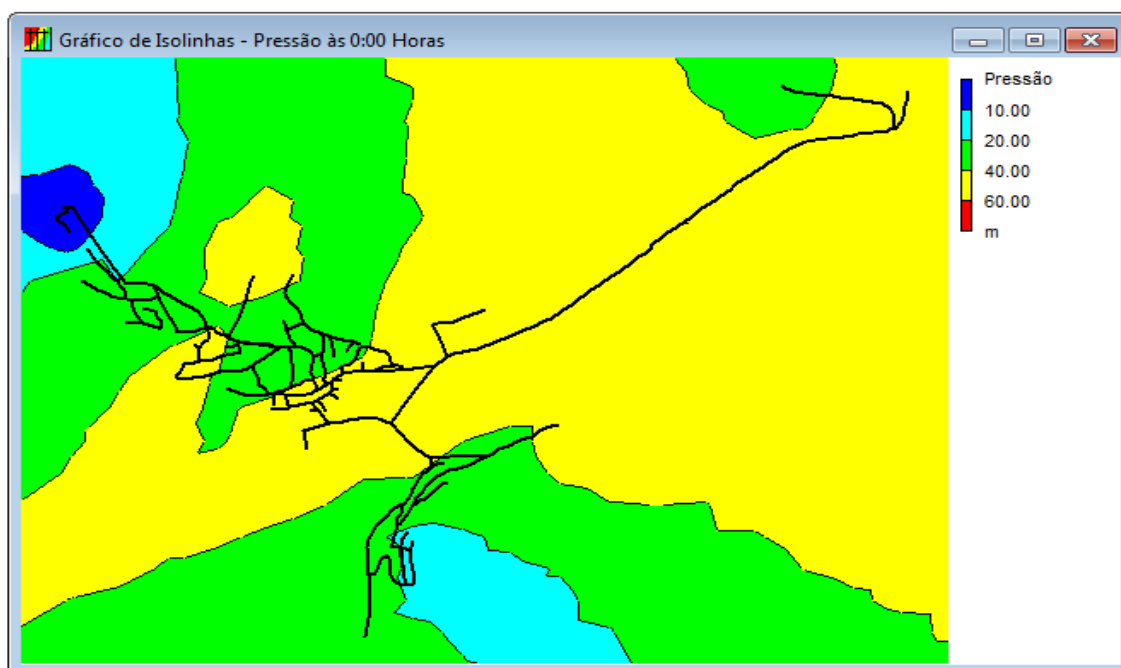


Figura 52 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 3 - EPANET 2.0

4.4.4 Solução 4

Para a quarta hipótese, a válvula foi introduzida no troço 330, situada entre os nós 490 (inicial) e 480 (final), onde a pressão varia entre os 51,20m e 54,22m, respectivamente.

A Figura 53 apresenta-se a localização da VRP, podendo observar que o troço 490 se encontra fechado, como mostram as setas indicativas da direcção do escoamento. O fecho do troço 320 resulta da necessidade de, impor que todo o volume de água destinado a abastecer os pontos de consumo a jusante da válvula passe pelo troço 330, de modo a ser controlado pelo dispositivo de redução de pressão.

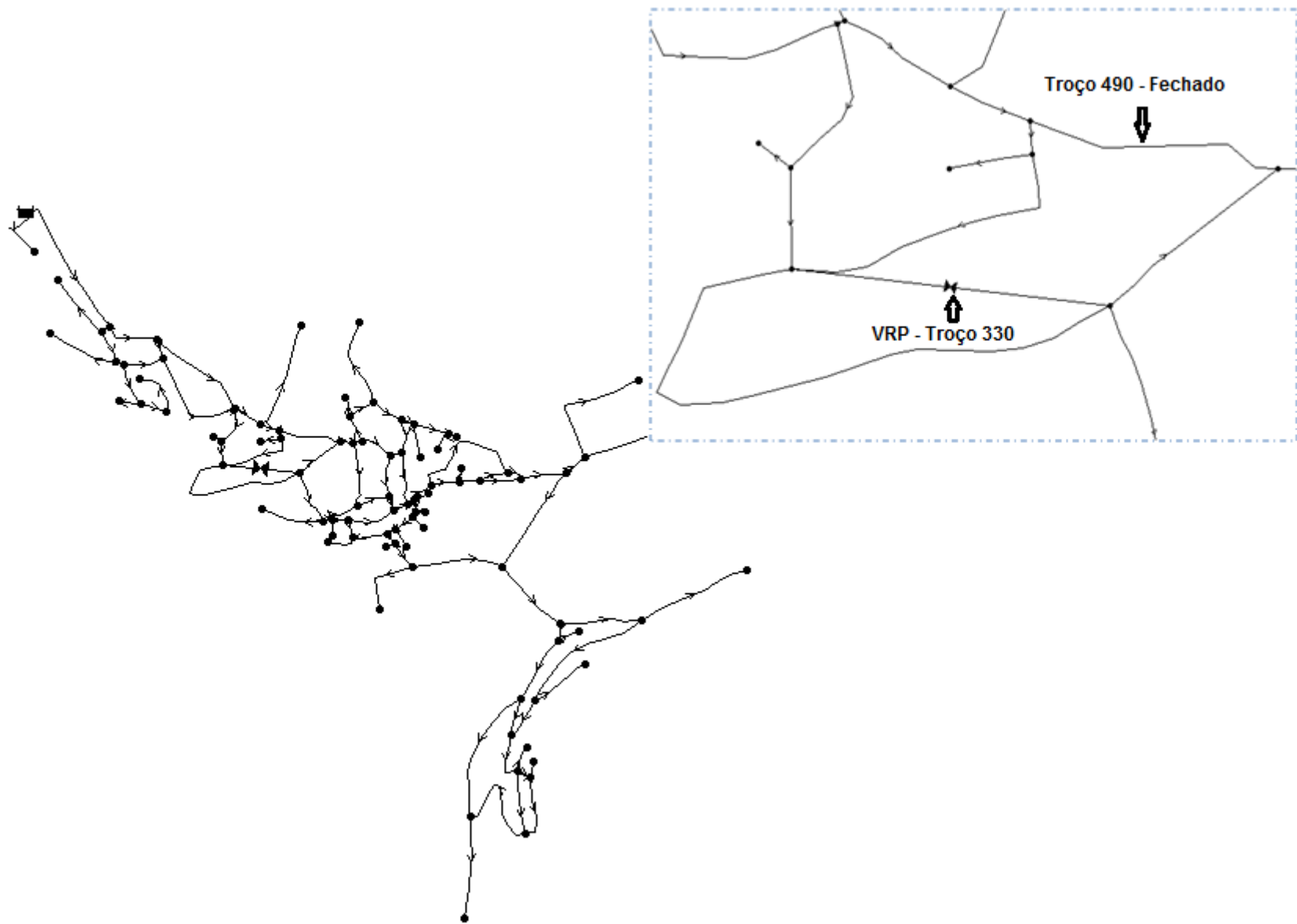


Figura 53 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 4 - EPANET 2.0

Na Figura 54 apresenta-se as informações relativas aos dados VRP introduzidos no simulador no Epanet 2.0 para a quarta solução. Os dados precedidos por um “*” foram os definidos pelo autor, sendo os restantes calculados pelo simulador.

Propriedade	Valor
Zona	
*Diâmetro	200
*Tipo	PRV
*Parâmetro de Controlo	20
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None
Caudal	3.88
Velocidade	0.12
Perda de Carga	34.21
Qualidade	0.00
Estado	Active

Figura 54 - Características da VRP utilizada na Solução 4 - EPANET 2.0

Na figura 55 apresenta-se, o gráfico de isolinhas que representa o nível de pressões existente na rede, após a introdução da VRP.

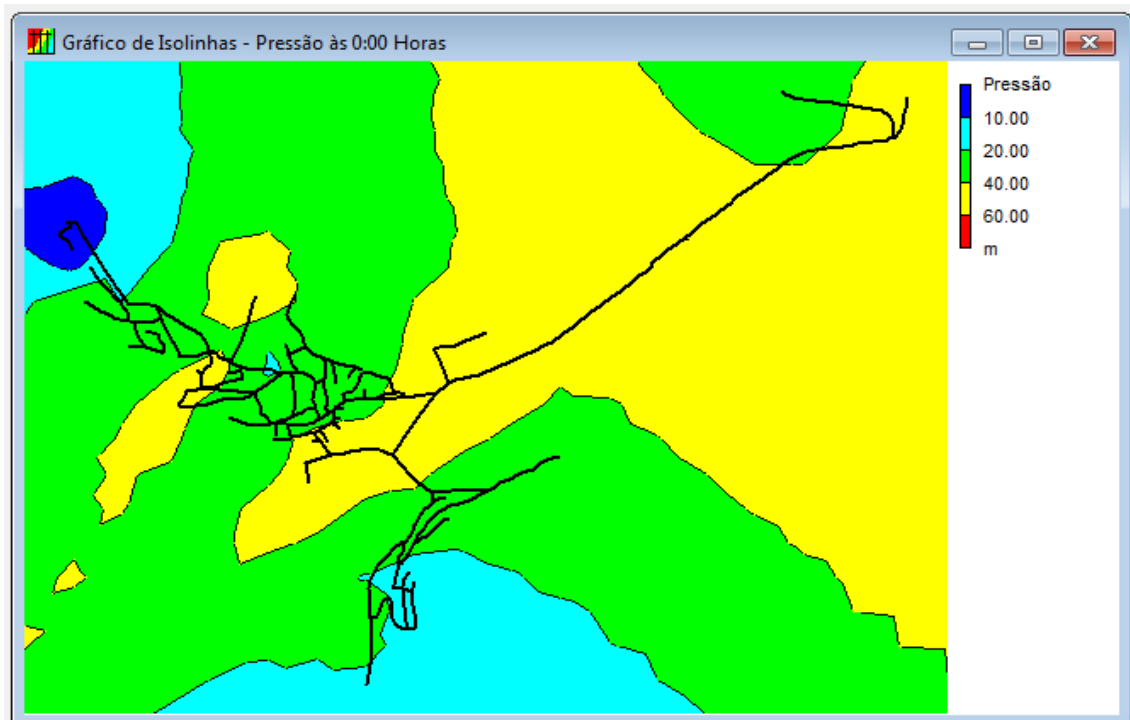
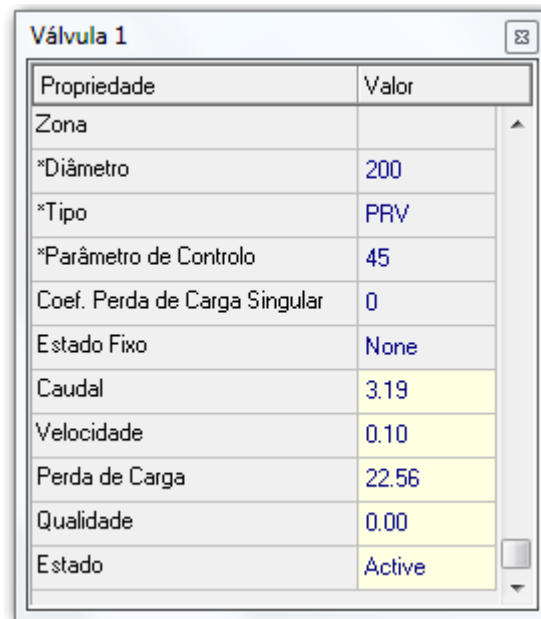


Figura 55 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 4 - EPANET 2.0

4.4.5 Solução 5

No quinto caso estudado, a válvula foi introduzida no troço 320, situada entre os nós 480 (inicial) e 470 (final), onde a pressão varia entre os 54,22m e 67,96m, respectivamente.

Na Figura 56 apresenta-se as informações relativas a VRP introduzidos no simulador no Epanet 2.0 para a quinta solução. Os dados precedidos por um “*” foram os definidos pelo autor, sendo os restantes calculados pelo simulador.



Propriedade	Valor
Zona	
*Diâmetro	200
*Tipo	PRV
*Parâmetro de Controlo	45
Coef. Perda de Carga Singular	0
Estado Fixo	None
Caudal	3.19
Velocidade	0.10
Perda de Carga	22.56
Qualidade	0.00
Estado	Active

Figura 56 - Características da VRP utilizada na Solução 5 - EPANET 2.0

A figura 57 apresenta-se a localização da VRP, podendo observar que os troços 430, 480 e 870 se encontram fechados, como mostram as setas indicativas da direcção do escoamento. O fecho dos troços 430, 480 e 870 resulta da necessidade de, impor que todo o volume de água destinado a abastecer os pontos de consumo a jusante da válvula passe pelo troço 330, de modo a ser controlado pelo dispositivo de redução de pressão.

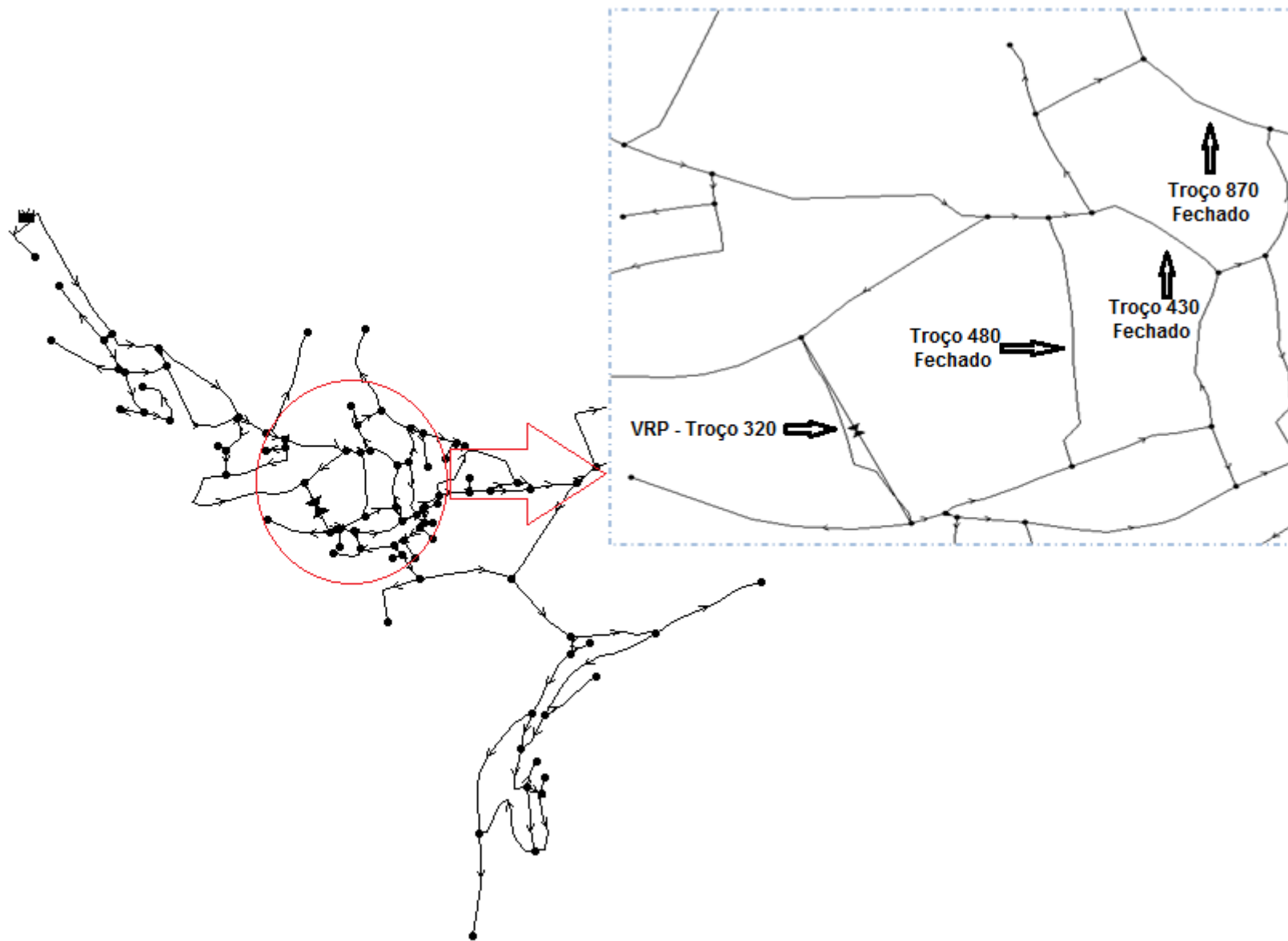


Figura 57 - Indicação do posicionamento da VRP na Solução 5 - EPANET 2.0

Na figura 58 apresenta-se, o gráfico de isolinhas que representa o nível de pressões existente na rede, após a introdução da VRP.

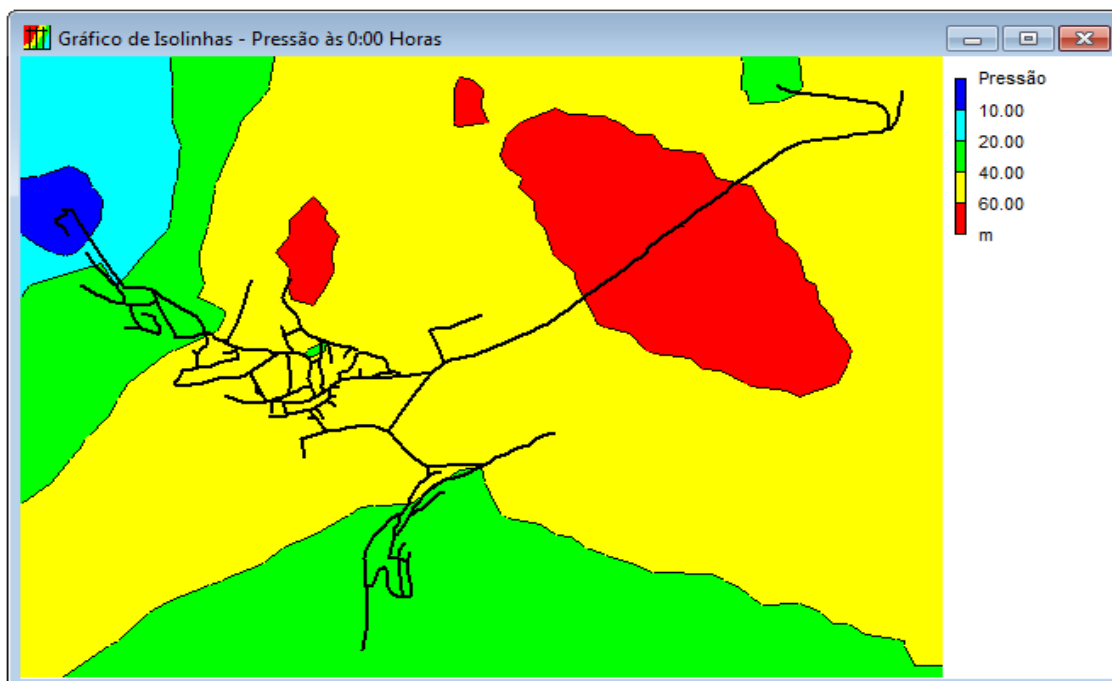


Figura 58 - Gráfico de isolinhas de Valores Médios para a Solução 5 - EPANET 2.0

Antes de passar a discussão dos resultados obtidos em cada uma das soluções é importante referir que, apesar de terem sido apresentados exclusivamente 5 hipóteses (resultados mais relevantes), foram analisadas variados cenários/locais para a implementação da válvula redutora de pressão.

4.4.6 Discussão dos Resultados

Apesar do resultado final de cada uma das soluções estudadas serem diferentes. No panorama geral ao comparar o gráfico de isolinhas que representa o nível actual de pressões existente na rede de distribuição, antes da introdução da válvula redutora de pressão, com os gráficos obtidos em cada uma das soluções, após a introdução destas, é perceptível uma clara redução relativamente as pressões máximas.

Do ponto de vista individual, salienta-se que apesar de a VRP estar localizada em diferentes locais, os resultados obtidos com as simulações para as soluções 1 e 2 são muito semelhantes.

Apesar das similaridades verificadas nos gráficos de isolinhas de pressão das soluções 3 e 4, não apresentando valores de pressão acima dos 60 m em nenhum nó da rede, em termos de valores máximos, a 4ª solução apresenta-se como sendo a melhor opção.

A última solução apresentada resulta, da necessidade de garantir que o abastecimento de água para os pontos de consumo situados ao longo dos troços mais antigos da rede de distribuição da freguesia Verdelhos (Figura 59) fosse assegurado directamente através do

reservatório de distribuição, deste modo o escoamento nessas secções do SDA não sofre influência da válvula redutora de pressão (Figura 59).

A especial atenção dada a pressão na zona antiga da rede advém, da preocupação por parte da entidade gestora, no sentido de manter os actuais níveis de pressão para toda esta área do sistema de distribuição.

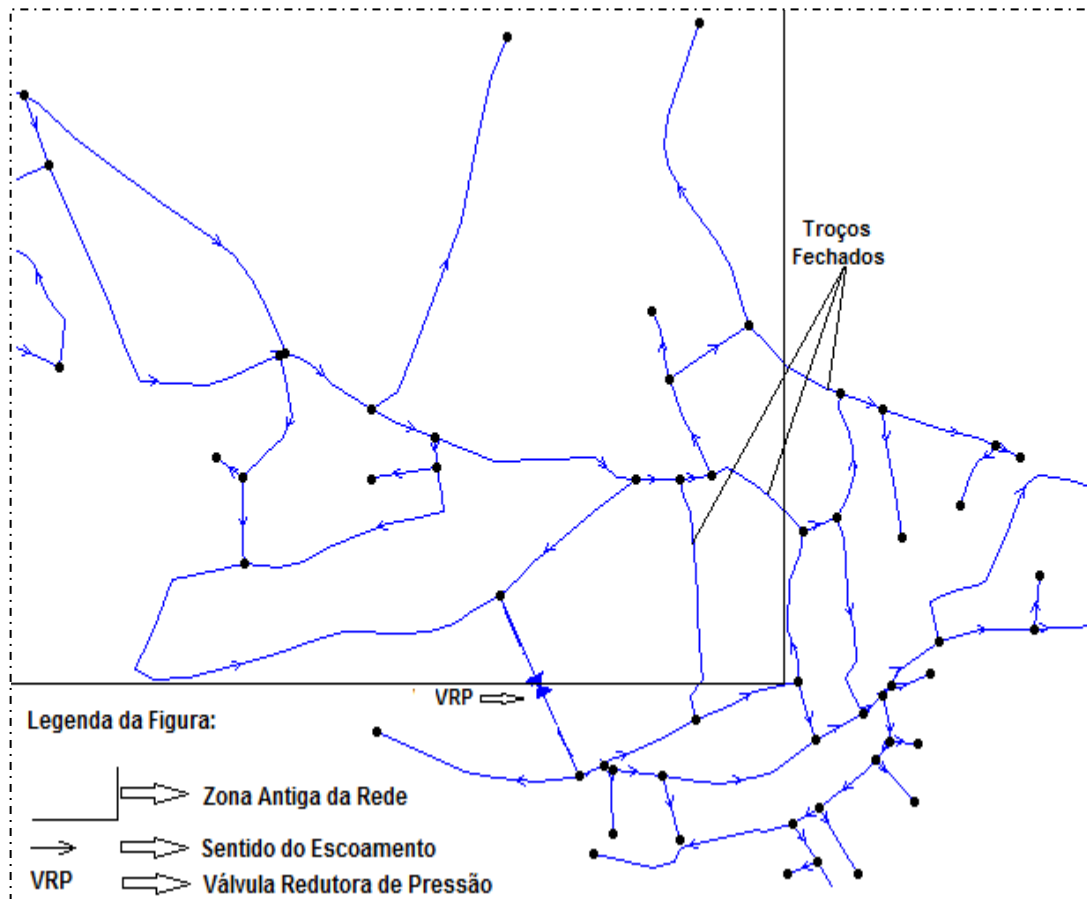
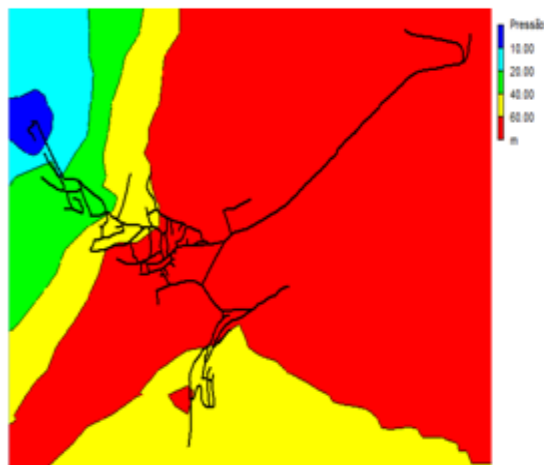
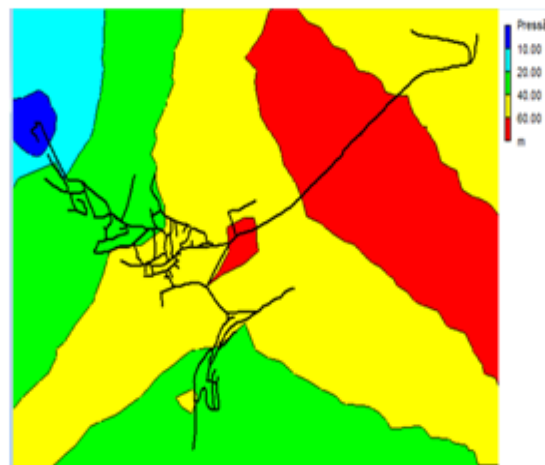


Figura 59 - Cenário utilizado para a criação da Solução 5 - EPANET 2.0

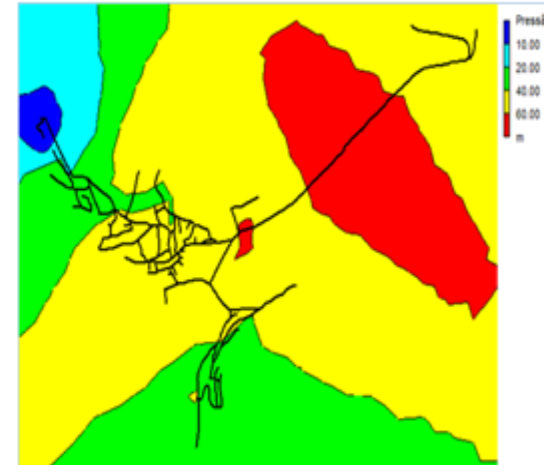
Na Figura 60 apresenta-se um resumo das isolinhas das pressões das 5 soluções estudadas.



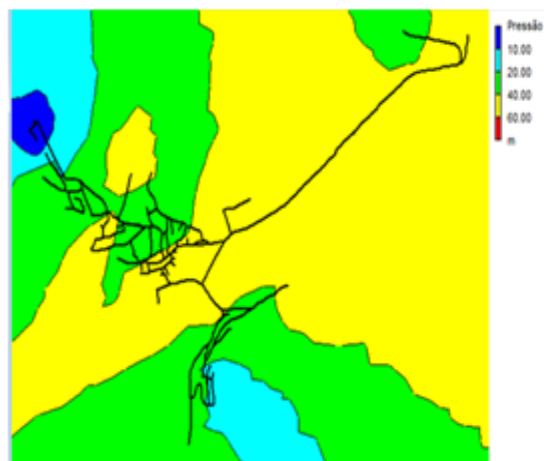
Pressões Actuais



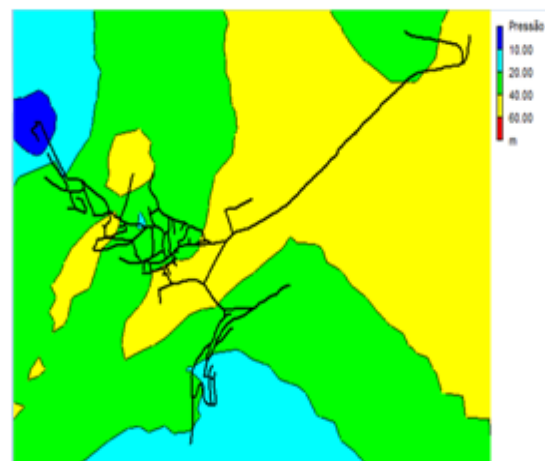
Solução 1



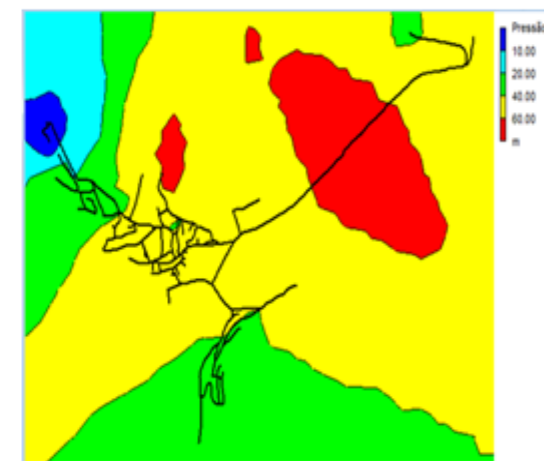
Solução 2



Solução 3



Solução 4



Solução 5

Figura 60 - Resumo das isolinhas de Valores Médios das Pressões das 5 Soluções - EPANET 2.0

5 Conclusões

Para o presente estudo foi analisado o sistema de distribuição de Verdelhos, rede que alia um nível de perdas de água que rondam os 70% do total da água fornecida, a valores de pressão interna que atingem os 90 m em alguns dos seus pontos. De forma a melhorar o desempenho hidráulico do sistema em causa, relativamente aos níveis de pressão e consequentemente a minimização das perdas físicas de água (perdas reais), foi proposta a implantação de uma válvula redutora de pressão.

Após a construção do modelo computacional, com base no simulador hidráulico Epanet 2.0, ela foi submetido, a um processo iterativo de calibração e validação, onde foram realizados ensaios de fuga no terreno que quando comparadas com os produzidos no simulador, conduziram a resultados finais satisfatórios. Os resultados positivos obtidos na calibração foram cruciais para que o modelo pudesse ser utilizado com confiança no estudo de locais para a inserção do dispositivo de redução de pressão na rede.

Deste estudo final resultaram 5 soluções, relativamente aos locais estratégicos para se proceder à introdução da VRP. Na tabela 18 apresenta-se, a relação entre a pressão verificada no modelo final calibrado (antes da implantação da VRP) e a obtida nas diversas soluções estudadas (após a implantação da VRP) para o nó 50, por se considerar o nó crítico dado apresentar o valor máximo de pressão verificado na rede.

Tabela 18 - Pressões máximas no nó 50

Nó 50		Pressão Máxima (m c.a.)	Redução Pressão %
Antes da Introdução da VRP	Modelo Calibrado	89,19	
Depois da Introdução da VRP	1º Solução	68,61	23,1
	2º Solução	67,01	24,9
	3º Solução	58,9	34,0
	4º Solução	54,14	39,3
	5º Solução	65,2	26,9

A introdução da VRP no troço 330 (4ª Solução) é de entre as cinco, a que apresenta melhor desempenho hidráulico, no que se refere aos níveis de pressão no sistema. Com esta solução para além de se assegurar a pressão mínima para todos os pontos de consumo da rede, também se garante que, tal como previsto no Decreto Regulamentar n.º 23/95, em todo instante do escoamento e para todos os nós da rede, a pressão mantém-se abaixo dos 60 m.

Contudo, após análise das soluções obtidas no estudo, chegou-se à conclusão que a 5ª solução seria aquela a adoptar futuramente no terreno. Deste modo a VRP será inserida na zona do SDA correspondente ao troço 320 do modelo computacional.

Esta decisão, resulta do facto de o posicionamento da válvula ir de encontro com a intenção da entidade gestora, em manter para a zona antiga da rede os níveis de pressão verificados actualmente, mesmo que este facto implique o funcionamento da rede com valores de pressão acima dos 60 m em certos nós (ver Figura 58).

Perante uma redução dos valores da pressão de 27% (solução 5), verificada com a inserção da VRP no modelo computacional, e sabendo que este foi calibrado e representa de forma fiável o comportamento do SDA da freguesia de Verdelhos. Prevê-se, ainda, que após implantação do dispositivo de redução da pressão no terreno, se verifique uma significativa melhoria na qualidade dos serviços prestados, uma melhoria das condições gerais de operacionalidade do sistema, benefícios financeiros devido a diminuição de roturas na rede (redução nos custos de manutenção) e estima-se uma redução das perdas de água na ordem dos 15% do valor verificado actualmente.

Recomendações futuras

Os resultados alcançados no decorrer deste estudo, não representam um fim em si mesmo, mas antes o ponto de partida para uma contínua gestão operacional da pressão, por parte da ADC (entidade gestora sistema de distribuição de água da freguesia de Verdelhos), de modo a minimizar as fugas ou roturas e a conseqüente redução das perdas físicas da água.

A construção/calibração do modelo e apresentação de diferentes soluções computacionais (com base no simulador hidráulico Epanet 2.0), de locais estratégicos para a inserção da válvula redutora de pressão no sistema de sistema de distribuição de água, precede e serve de base para uma futura implantação no terreno deste dispositivo.

Poderá ser interessante no futuro, após a inserção da VRP, proceder-se à criação de pontos de medição e controlo em toda a rede, que para além de permitem um conhecimento real e permanente da quantidade da água e das pressões existentes na rede, poderão ainda fornecer dados do terreno para que se possa realizar uma comparação destes com os obtidos no modelo computacional agora apresentado.

O projecto *Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água* (INSAA), veio demonstrar que só é possível tirar real partido da modelação quando existe uma estrutura interna à entidade gestora que permita criar, actualizar e explorar os modelos de uma forma fiável e eficiente.

Deste modo, espera-se que o presente estudo, venha não só, contribuir para a resolução das questões técnicas, controlo de pressão e redução das perdas de água, ligadas à rede da freguesia de Verdelhos (representa 1,5 % do total da população servida), mas também para que no futuro na EG, em questão, este tipo de ferramenta seja incorporado numa escala mais abrangente e que este investimento seja acompanhado por formas mais organizadas e eficazes de suporte da informação cadastral.

Referências Bibliográficas

Águas da Covilhã (ADC - Entidade Gestora). Acedido em 1 Novembro de 2010 em: <http://www.aguasdacovilha.pt>

Alegre, H. (1992). *Instrumentos de Apoio à Gestão Técnica de Sistemas de Distribuição de Água*, LNEC, Lisboa.

Alegre, H. (1994). *Instrumentos de Apoio à Gestão Técnica de Sistemas de Distribuição de Água*, LNEC, Lisboa.

Alegre, H. (2002). *Modelos de Simulação de Sistemas de Distribuição de Água - Métodos de Avaliação e Distribuição de Consumos na Rede. Informação Técnica e Científica de Hidráulica*, LNEC, Lisboa.

Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J.M., Parena, R. (2004). *Indicadores de desempenho para serviços de água, Manual de boa prática*, (versão portuguesa), IRAR e LNEC, Lisboa.

Alegre, H., Coelho, S. T., Almeida, M. C., Vieira, P. (2005). *Controlo das Perdas de Água em Sistemas Públicos de Adução e Distribuição*, Série Guias Técnicos 3. IRAR, INAG, LNEC.

Antunes, A. et al., (2009). *Controlo de Perdas e Fugas de Água nos de Sistemas de Distribuição de Água*, GEPAL

AWWA - American Water Works Association (1999). Calibration guidelines for water distribution system modeling. Water Works Association Engineering Computer Applications Committee. EUA.

Bairos, A. F. A. (2008). *Válvulas de Controlo Automático na Segurança e Gestão Operacional de Sistemas de Abastecimento e Drenagem: o comportamento das VRP*, IST, Lisboa.

Bello, S. (2001). *Seminário de Mecânica dos Fluidos - Válvulas*. Universidade Salvador. Brasil.

Charalambous, B. (2005) *Effective Pressure Management of District Metered Areas*. Halifax. Canada.

Coelho, S. T., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). *Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água. Série: Guias Técnicos 4*, LNEC e IRAR, Lisboa.

Covas, D., Ramos, H. (1998). *A Utilização de Válvulas Redutoras de Pressão no Controlo e Redução de Fugas em Sistemas de Distribuição de Água*. 8º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Barcelos 27 a 30 de Outubro, 1998.

CSOPT e LNEC (1991). *Seminário sobre o projecto Regulamento Geral de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais*, Conselho Superior de Obras Públicas e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa.

De Marsily, G. (1994) *A água*, Instituto Piaget.

Dias, N. (2004). Diagnóstico de Sistemas de Abastecimento de Água para diferentes condições de Operacionalidade e Segurança. Projecto Final de Curso, IST, Lisboa.

Duarte, A. (2009). *Controlo e Gestão de Perdas em Sistemas de Distribuição de Água*, IST, Lisboa.

EMBASA - Empresa baiana de Água e Saneamento S.A. Acedido em 28 de Agosto de 2011 em: <http://www.embasa.ba.gov.br/>

Environmental Canada. Acedido em 1 Novembro de 2010 em: <http://www.ec.gc.ca/eau-water>

ERSAR - Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos. Acedido em 6 de Maio de 2011 em: <http://www.ersar.pt/website>

Farley, M., Trow, S. (2003). *Losses in Water Distribution System Networks*, International Water Association.

Herrin, G. (2001). *The fundamentals of calibration - Current Methods*, Vol 1, No. 1, Haestad Press Publication.

International Desalination Association. Acedido em 6 de Dezembro de 2010 em: www.idadesal.org

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Acedido em 1 de Janeiro de 2010 em: <http://www-ext.lnec.pt/LNEC/epanet/fich/index.html>

Loureiro, D., Coelho, S. T. (2002). *EPANET 2.0 em português - Manual do Utilizador*, LNEC, Lisboa.

Marques, J., Sousa, J. (2008). *Hidráulica Urbana - Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais*.

WRC - Water Research Center (1989). *Water Distribution Systems Handbook*.

Oxford Business Group (2008). *The Report: Libya*

PEAASAR (2007). *Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais*, Ministério do Ambiente, do Ordenamento, do Território e do Desenvolvimento Regional.

PNA (2002). *Plano Nacional da Água*, Ministério do Ambiente.

PNA (2005). *Plano Nacional para o Uso Eficiente de Água*, Ministério do Ambiente.

RASARP - Relatório Anual do Sector de Águas e Resíduos em Portugal do ano 2008. Edição Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos.

Rogers, S. J., Davey, B. H. (2005). *Agricultural Adjustment Unit*, University of Newcastle

Saint-Gobain, *Catálogo de Válvulas Redutoras de Pressão*. Acedido em 7 de Setembro de 2011 em: www.saint-gobain-pam.pt

VALLOY (2002), *Catálogo de Válvulas Redutoras de Pressão*. Brasil.

VIDIGAL, P. (2008). *Análise Alargada de Parâmetros Técnico-Hidráulicos e Avaliação de Desempenho de Sistemas de Abastecimento de Água*, IST, Lisboa

SILVA, G. (2004). *Válvulas de Controlo*. 2ª Edição. Escola Superior Tecnologia Setúbal.

Villiers, M. (2001). *Water: The Fate of Our Most Precious Resource*, Mariner Books.

WALSKI T. (2001). *Acceptable levels of calibration. Current Methods, Vol 1, No. 1, Haestad Press Publication*.

Water Research Center (1989). *Network analysis - a code of practice*. Reino Unido.

World Resources Institute. Acedido em 10 Novembro de 2010 em: <http://earthtrends.wri.org>

World Water Organization. Acedido em 10 de Novembro de 2010 em: <http://www.worldwater.org/conflict/index.html>

ANEXOS

Anexo I - Listagem do ficheiro de introdução de dados do SDA para o Epanet 2.0

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Caudal LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
Tubagem T10	144.13	67.8	130	1.21	0.33	2.53	Open
Tubagem T20	173.65	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T30	86.80	57	130	0.08	0.03	0.04	Open
Tubagem T40	91.22	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T60	90.09	67.8	130	-1.30	0.36	2.87	Open
Tubagem T70	84.70	57	130	0.18	0.07	0.17	Open
Tubagem T80	19.02	81.4	130	-0.21	0.04	0.04	Open
Tubagem T90	81.13	57	130	-0.19	0.07	0.19	Open
Tubagem T100	34.24	57	130	0.02	0.01	0.00	Open
Tubagem T110	150.10	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T120	52.55	67.8	130	-0.18	0.05	0.08	Open
Tubagem T130	81.89	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T140	28.79	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T150	106.48	57	130	0.86	0.34	3.11	Open
Tubagem T160	89.57	57	130	0.03	0.01	0.01	Open
Tubagem T170	37.37	57	130	-1.25	0.49	6.26	Open
Tubagem T180	11.95	57	130	-1.31	0.51	6.81	Open
Tubagem T190	22.43	57	130	-0.81	0.32	2.80	Open
Tubagem T200	18.50	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T210	155.54	57	130	0.56	0.22	1.40	Open
Tubagem T220	15.81	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T230	11.32	57	130	0.01	0.00	0.01	Open
Tubagem T240	20.51	57	130	0.02	0.01	0.00	Open

Anexo I - Listagem do ficheiro de introdução de dados do SDA para o Epanet 2.0 (Cont.)

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Caudal LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
Tubagem T250	26.99	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T260	12.18	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T270	22.88	57	130	-0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T280	81.87	57	130	0.02	0.01	0.00	Open
Tubagem T290	22.02	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T300	63.17	57	130	0.78	0.31	2.63	Open
Tubagem T310	118.97	57	130	-1.02	0.40	4.29	Open
Tubagem T320	71.45	57	130	-0.94	0.37	3.72	Open
Tubagem T330	208.46	57	130	-1.07	0.42	4.69	Open
Tubagem T340	26.02	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T350	65.82	57	130	0.05	0.02	0.02	Open
Tubagem T360	39.24	57	130	0.06	0.03	0.03	Open
Tubagem T370	20.72	57	130	-1.07	0.42	4.69	Open
Tubagem T380	14.32	57	130	0.67	0.26	1.97	Open
Tubagem T390	70.66	57	130	1.09	0.43	4.83	Open
Tubagem T400	10.23	57	130	-0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T410	25.77	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T420	43.77	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T430	43.72	57	130	-0.94	0.37	3.69	Open
Tubagem T440	12.21	67.8	130	-1.52	0.42	3.87	Open
Tubagem T450	9.93	67.8	130	0.08	0.02	0.01	Open
Tubagem T460	36.31	57	130	0.56	0.22	1.43	Open
Tubagem T470	35.30	57	130	0.54	0.21	1.32	Open

Anexo I - Listagem do ficheiro de introdução de dados do SDA para o Epanet 2.0 (Cont.)

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Caudal LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
Tubagem T480	84.63	67.8	130	0.80	0.22	1.17	Open
Tubagem T490	81.12	67.8	130	-2.81	0.78	12.09	Open
Tubagem T500	26.54	81.4	130	-2.99	0.57	5.54	Open
Tubagem T510	72.87	57	130	-0.02	0.01	0.00	Open
Tubagem T520	137.81	81.4	130	-2.93	0.56	5.33	Open
Tubagem T540	134.80	57	130	-1.22	0.48	5.95	Open
Tubagem T550	50.37	57	130	1.07	0.42	4.66	Open
Tubagem T560	12.14	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T570	55.81	57	130	-0.07	0.03	0.03	Open
Tubagem T580	11.62	57	130	-1.11	0.43	5.02	Open
Tubagem T590	52.95	57	130	-0.95	0.37	3.78	Open
Tubagem T600	93.85	57	130	0.02	0.01	0.00	Open
Tubagem T610	64.50	57	130	0.02	0.01	0.00	Open
Tubagem T620	130.75	57	130	0.02	0.01	0.00	Open
Tubagem T630	9.19	57	130	-0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T640	20.59	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T650	139.82	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T660	34.36	57	130	-0.03	0.01	0.01	Open
Tubagem T670	88.66	57	130	0.03	0.01	0.01	Open
Tubagem T680	42.03	57	130	-1.06	0.42	4.65	Open
Tubagem T690	9.89	57	130	-1.04	0.41	4.42	Open
Tubagem T700	31.44	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T710	66.62	81.4	130	-3.24	0.62	6.46	Open

Anexo I - Listagem do ficheiro de introdução de dados do SDA para o Epanet 2.0 (Cont.)

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Caudal LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
Tubagem T720	25.65	81.4	130	-2.00	0.38	2.63	Open
Tubagem T730	2.44	200	100	-1.83	0.06	0.06	Open
Tubagem T740	38.48	81.4	130	-3.01	0.58	5.63	Open
Tubagem T750	29.36	57	130	1.04	0.41	4.46	Open
Tubagem T760	95.78	57	130	-0.05	0.02	0.02	Open
Tubagem T770	81.57	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T780	11.63	57	130	-0.91	0.36	3.50	Open
Tubagem T790	1.30	57	130	-0.84	0.33	2.98	Open
Tubagem T800	19.28	57	130	-0.81	0.32	2.81	Open
Tubagem T810	20.04	57	130	1.84	0.72	12.76	Open
Tubagem T820	9.79	57	130	2.90	1.14	29.82	Open
Tubagem T830	41.66	57	130	0.84	0.33	3.03	Open
Tubagem T840	17.10	67.8	130	-2.82	0.78	12.12	Open
Tubagem T850	24.26	57	130	0.01	0.00	0.00	Open
Tubagem T860	114.18	57	130	0.02	0.01	0.00	Open
Tubagem T870	43.19	57	130	-0.51	0.20	1.20	Open
Tubagem T880	17.32	57	130	-0.06	0.02	0.03	Open
Tubagem T890	44.95	57	130	-0.04	0.01	0.01	Open
Tubagem T900	44.38	57	130	-0.43	0.17	0.88	Open
Tubagem T910	52.59	57	130	-0.25	0.10	0.32	Open
Tubagem T920	16.24	57	130	-1.28	0.50	6.50	Open
Tubagem T930	27.13	57	130	-1.34	0.52	7.10	Open
Tubagem T940	8.03	57	130	-1.37	0.54	7.44	Open

Anexo I - Listagem do ficheiro de introdução de dados do SDA para o Epanet 2.0 (Cont.)

ID do Troço	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade	Caudal LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
Tubagem T950	15.68	57	130	-1.40	0.55	7.70	Open
Tubagem T960	5.09	57	130	1.49	0.58	8.68	Open
Tubagem T970	24.08	57	130	1.47	0.57	8.42	Open
Tubagem T980	37.36	57	130	0.88	0.35	3.27	Open
Tubagem T990	26.45	57	130	0.85	0.33	3.09	Open
Tubagem T1000	52.00	57	130	0.57	0.22	1.47	Open
Tubagem T1010	37.75	57	130	-0.27	0.10	0.36	Open
Tubagem T1020	56.99	57	130	1.35	0.53	7.24	Open
Tubagem T1030	32.83	57	130	-0.14	0.05	0.10	Open
Tubagem T1040	452.40	57	130	-0.09	0.04	0.05	Open
Tubagem T1050	381.36	57	130	0.05	0.02	0.02	Open
Tubagem T1060	68.71	57	130	0.04	0.01	0.01	Open
Tubagem T1070	257.44	57	130	0.01	0.01	0.00	Open
Tubagem T1080	104.71	67.8	130	-2.20	0.61	7.68	Open
Tubagem T1090	179.72	67.8	130	-0.21	0.06	0.10	Open
Tubagem T1100	47.13	81.4	130	-0.87	0.17	0.56	Open
Tubagem T1110	22.77	67.8	130	-1.33	0.37	3.01	Open
Tubagem T1120	178.28	57	130	-0.40	0.16	0.77	Open
Tubagem T1130	141.32	57	130	0.35	0.14	0.61	Open
Tubagem T1140	65.25	81.4	130	-0.42	0.08	0.15	Open
Tubagem T1150	189.54	81.4	130	-4.38	0.84	11.26	Open
Tubagem T1160	5.89	81.4	130	4.42	0.85	11.43	Open

Anexo II- Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final

Área de Facturação	Consumo (m ³ /ano)	Consumo (l/s) × 10 ³	Nós	%	Consumo nos nós (l/s) × 10 ³
A	2041	64,72	1030	0,05	3,24
			820	0,3	19,42
			760	0,3	19,42
			740	0,3	19,42
			690	0,05	3,24
			660	0	0
B	1139	36,12	700	0,3	10,84
			930	0,5	18,06
			810	0,2	7,22
C	256	8,12	840	0,6	4,87
			830	0,4	3,25
D	199	6,31	800	0,7	4,42
			790	0,3	1,89
E	174	5,52	800	0,5	2,76
			730	0,5	2,76
F	466	14,78	730	1	14,78
G	481	15,25	940	0,2	3,05
			790	0,4	6,10
			850	0,4	6,10
H	206	6,53	860	0,8	5,23
			850	0,2	1,31
I	125	3,96	720	0,15	0,59
			770	0,7	2,77
			780	0,15	0,59
J	736	23,34	720	1	23,34
K	38	1,20	510	0,5	0,60
			500	0,5	0,60
L	633	20,07	490	0,6	12,04
			500	0,4	8,03
M	5757	182,55	480	0,3	54,77
			520	0,2	36,51
			660	0,5	91,28
N	69	2,19	690	0	0
			920	1	2,19
O	158	5,01	480	1	5,01

Anexo II - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (Cont.)

Área de Facturação	Consumo (m ³ /ano)	Consumo (l/s) × 10 ³	Nós	%	Consumo nos nós (l/s) × 10 ³
P	434	13,76	470	0,2	2,75
			480	0,8	11,01
Q	1284	40,72	10	0,04	1,63
			280	0,08	3,26
			290	0,06	2,44
			300	0,08	3,26
			320	0,15	6,11
			330	0,06	2,44
			420	0,06	2,44
			440	0	0
			460	0,06	2,44
			470	0,08	3,26
			530	0	0
			580	0,04	1,63
			950	0,08	3,26
960	0,06	2,44			
1000	0,15	6,11			
R	267	8,47	540	0,5	4,23
			650	0,5	4,23
S	344	10,91	530	0,3	3,27
			540	0,4	4,36
			550	0,3	3,27
T	814	25,81	460	0,2	5,16
			550	0,5	12,91
			560	0,3	7,74
U	739	23,43	570	0,3	7,03
			580	0,3	7,03
			680	0	0
			980	0,2	4,69
			990	0,2	4,69
V	604	19,15	520	0,3	5,75
			640	0,4	7,66
			650	0,3	5,75
W	919	29,14	280	0,5	14,57
			320	0,5	14,57
X	59	1,87	620	0,4	0,75
			600	0,4	0,75
			590	0,2	0,37
Y	157	4,98	620	0,6	2,99
			630	0,4	1,99

Anexo II - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (Cont.)

Área de Facturação	Consumo (m ³ /ano)	Consumo (l/s) × 10 ³	Nós	%	Consumo nos nós (l/s) × 10 ³
Z	18	0,57	600	0,5	0,29
			610	0,5	0,29
AA	64	2,03	300	0,5	1,01
			310	0,5	1,01
BB	94	2,98	640	0,2	0,60
			670	0,5	1,49
			970	0,3	0,89
CC	26	0,82	670	0,5	0,41
			680	0,5	0,41
	36	1,14	280	0	0
			1000	1	1,14
EE	55	1,74	440	0,5	0,87
			450	0,5	0,87
FF	107	3,39	410	0,6	2,04
			420	0,4	1,36
GG	266	8,43	430	1	8,43
HH	364	11,54	260	0,35	4,04
			270	0,2	2,31
			350	0,2	2,31
			370	0,25	2,89
II	96	3,04	230	0	0
			250	0,4	1,22
			260	0	0
			400	0,6	1,83
JJ	7740	245,43	230	0,9	220,89
			240	0,1	24,54
KK	159	5,04	270	0,3	1,51
			390	0,7	3,53
LL	337	10,69	370	0	0
			380	1	10,69
MM	53	1,68	350	0,5	0,84
			360	0,5	0,84
NN	21	0,67	330	0,5	0,33
			340	0,5	0,33
OO	459	14,55	20	0,6	8,73
			230	0,4	5,82

Anexo II - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (Cont.)

Área de Facturação	Consumo (m ³ /ano)	Consumo (l/s) × 10 ³	Nós	%	Consumo nos nós (l/s) × 10 ³
PP	1478	46,87	10	0,15	7,03
			20	0,15	7,03
			30	0,35	16,40
			50	0,07	3,28
			60	0,1	4,69
			70	0	0
			80	0,04	1,87
			890	0	0
			1010	0,1	4,69
			1020	0,04	1,87
QQ	217	6,88	30	0,4	2,75
			40	0,6	4,13
RR	1133	35,93	110	0,25	8,98
			120	0,3	10,78
			180	0,4	14,37
			220	0,05	1,80
SS	279	8,85	160	0,5	4,42
			220	0,5	4,42
TT	36	1,14	120	0,5	0,57
			210	0,5	0,57
UU	780	24,73	160	0,6	14,84
			170	0,15	3,71
			190	0,25	6,18
VV	173	5,49	190	0,5	2,74
			200	0,5	2,74
WW	626	19,85	110	0,43	8,54
			870	0,2	3,97
			880	0,37	7,34
XX	429	13,60	90	0	0
			100	0,17	2,31
			130	0,4	5,44
			870	0,34	4,63
			910	0,09	1,22
YY	168	5,33	140	0	0
			150	1	5,33

Anexo III - Valores dos coeficientes do padrão de consumo para os nós da rede

Período do Ciclo Diário	Factor de Consumo
1	0,876
2	0,876
3	0,876
4	0,867
5	0,865
6	0,871
7	0,867
8	0,861
9	0,855
10	0,851
11	0,851
12	0,847
13	0,845
14	0,843
15	0,841
16	0,841
17	0,843
18	0,845
19	0,855
20	0,859
21	0,871
22	0,891
23	0,905
24	0,939
25	0,981
26	0,997
27	0,997
28	1,017
29	1,031
30	1,026
31	1,036
32	1,060
33	1,067
34	1,069
35	1,088

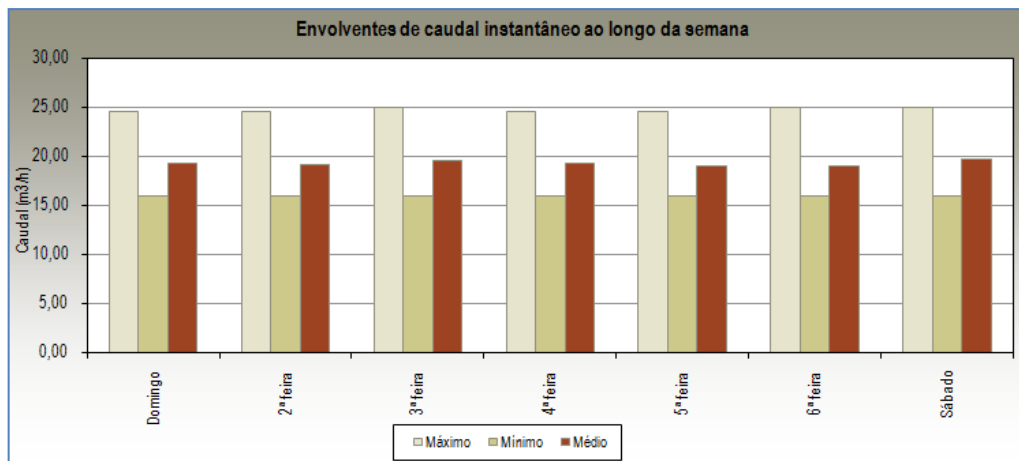
Anexo III - Valores dos coeficientes do padrão de consumo para os nós da rede (Cont.)

Período do Ciclo Diário	Factor de Consumo
36	1,116
37	1,128
38	1,128
39	1,144
40	1,139
41	1,129
42	1,129
43	1,103
44	1,076
45	1,086
46	1,090
47	1,080
48	1,079
49	1,085
50	1,076
51	1,042
52	1,024
53	1,015
54	0,999
55	0,998
56	1,014
57	1,020
58	1,028
59	1,021
60	1,010
61	1,023
62	1,012
63	0,988
64	0,972
65	0,962
66	0,972
67	0,988
68	1,013
69	1,025
70	1,012
71	1,021
72	1,033

Anexo III - Valores dos coeficientes do padrão de consumo para os nós da rede (Cont.)

Período do Ciclo Diário	Factor de Consumo
73	1,043
74	1,072
75	1,084
76	1,094
77	1,104
78	1,110
79	1,144
80	1,155
81	1,130
82	1,104
83	1,093
84	1,105
85	1,109
86	1,113
87	1,090
88	1,049
89	1,019
90	0,995
91	0,961
92	0,925
93	0,910
94	0,913
95	0,908
96	0,890

Anexo IV - Envolventes de caudal instantâneo ao longo da semana.



Anexo V - Padrões adimensionais de caudal.

